



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DETECÇÃO DE DUTOS ENTERRADOS
EMPREGANDO OS MÉTODOS GPR E
ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO

RODRIGO DE FREITAS VALOIS RIOS

SALVADOR – BAHIA

DEZEMBRO – 2011

Detecção de dutos enterrados empregando os métodos GPR e eletromagnético
indutivo

por

RODRIGO DE FREITAS VALOIS RIOS

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora



Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho - Orientador



Dra. Jacira Cristina de Freitas Lucas



Dr. Jailton Souza De Almeida

Data da aprovação: 20/12/2011

Dedico este trabalho aos meus pais,
ao meu irmão, à minha avó, à
minha noiva e à minha família.

RESUMO

Neste trabalho foram utilizados os métodos GPR e eletromagnético indutivo com o objetivo de detectar dutos metálicos enterrados. Os equipamentos utilizados foram o GPR RAMAC do fabricante Mala Geoscience com antenas de frequências de 100, 200 e 400 MHz e para o método eletromagnético foi utilizado o Profiler EMP-400 do fabricante GSSI, utilizando vários arranjos de bobinas nas frequências de 1000, 7000 e 15000 Hz.

A área de estudo foi a faixa de dutos GASEB (Gasoduto Sergipe-Bahia) de domínio da Transpetro e a aquisição de dados foi feita nas margens dos rios Quiricó Grande e Sauípe.

Foram feitos cinco perfis de GPR em cada margem dos rios, sendo o primeiro localizado o mais perto possível do rio e os outros quatro distanciados de 10, 20, 30 e 50 metros do primeiro perfil. Todas as linhas foram feitas paralelas entre si e transversais à faixa de dutos. Também foram realizados levantamento de dados com o método eletromagnético com 6 linhas paralelas espaçadas de 2 metros ocupando as faixas de 0 a 10, 20 a 30 e 40 a 50 metros do rio.

Analisando os perfis de GPR foi possível perceber que a capacidade de detectar dutos diminui à medida que as linhas são localizados mais próximas do rio. Isto acontece devido à presença de argilominerais combinado com o aumento da saturação de água do solo. Com o GPR é possível detectar o duto, que é representado por uma hipérbole de difração no radargrama e a curvatura da hipérbole fornece a velocidade de propagação do pulso eletromagnético no terreno acima do duto que ocorreu a difração. Foi utilizado as antenas de 100, 200 e 400 MHz observou-se que as antenas de 100 e 200 MHz apresentaram um melhor desempenho para localizar os dutos.

O método eletromagnético indutivo apresentou uma boa capacidade na detecção de dutos metálicos e permitiu rastrear a direção dos dutos. O arranjo de bobinas que obteve o melhor resultado foi o VDM (momento de dipolo vertical) no modo *broadside*.

ABSTRACT

In this work, GPR method and induced electromagnetic method were applied aiming for detecting buried metal pipes. The equipment used were GPR RAMAC, from manufacturer Mala Geoscience, with antennas of frequencies of 100, 200 and 400 MHz, and for the electromagnetic method was used Profiler EMP-400, from manufacturer GSSI, using many coil arrays in frequencies of 1000, 7000 and 15000 Hz.

The area of study was the ducts band GASEB (Sergipe-Bahia gas pipeline) from Transpetro domain, and the data acquisition was made on bank of Quiricó and Sauipe rivers.

Five GPR profiles were made on each river bank. The first one was nearest the bedriver, while the other four had distances of 10, 20, 30 and 50 meters from the first profile. Every line was parallel to each other and transverse to pipelines. Also, a data survey with electromagnetic method was made, with 6 parallel lines spaced 2 meters, being in zones from 0 to 10, 20 to 30 and 40 to 50 meters away of the river.

Analyzing the GPR profiles, it was possible to see that the capacity of detecting pipes decreases with the lines nearer to the bedriver. This happens because of the presence of clay minerals and the increasing of the water saturation of soil. With the GPR, it is possible to detect the pipe, which is showed in radargram as a diffraction hyperbola, and the hyperbola slope gives the electromagnetic pulse propagation velocity in the terrain above the pipe where occurred the diffraction. Antennas of 100, 200 and 400 MHz were used, and it was possible to see that antennas of 100 and 200 MHz showed a better development to locate the pipes.

The induced electromagnetic method showed a good capacity in the detection of metal pipes and permitted trace pipe directions. The coil array that achieved better results was VDM (vertical dipole moment) in broadside.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABELAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Fundamentação teórica	3
1.1 Princípios e teoria do método GPR	3
1.1.1 Equipamento e funcionamento do radar	3
1.1.2 Equações de Maxwell	3
1.1.3 Relações constitutivas	4
1.1.4 Parâmetros de propagação de ondas eletromagnéticas	5
1.1.5 Perdas de energia, atenuação e profundidade de penetração do sinal	8
1.1.6 Resolução vertical e horizontal	10
1.1.7 Propriedades dielétricas das rochas	13
1.1.8 Aquisição de dados	15
1.1.9 Aplicações para o método GPR	19
1.2 Princípios e teoria do método eletromagnético indutivo	20
1.2.1 Profundidade de penetração dos campos eletromagnéticos	22
1.2.2 Arranjos de bobinas	22
1.2.3 Condutividade aparente	24
1.2.4 Aplicações para o método eletromagnético indutivo	24
CAPÍTULO 2 Metodologia	25
2.1 Localização da área de estudo	25
2.2 Equipamentos utilizados	25
2.2.1 Sistema RAMAC	25
2.2.2 Profiler EMP-400	26
2.3 Aquisição de dados	28
2.4 Processamento e visualização dos dados	29

CAPÍTULO 3	Resultados obtidos	31
3.1	Rio Quiricó Grande	31
3.1.1	Margem direita do rio Quiricó Grande	31
3.1.2	Margem esquerda do rio Quiricó Grande	47
3.2	Rio Sauípe	58
3.2.1	Margem direita do rio Sauípe	58
3.2.2	Margem esquerda do rio Sauípe	69
CAPÍTULO 4	Conclusões	73
Agradecimentos		75
Referências Bibliográficas		76

ÍNDICE DE TABELAS

1.1	Valores de constante dielétrica (ϵ'_r), condutividade elétrica(σ), velocidade (v) e atenuação (α)para alguns materiais geológicos a 100 MHz (Davis e Annan, 1989).	7
1.2	Estimativa da profundidade máxima de penetração em função da frequência central das antenas (Porsani, 1999).	11
1.3	Resolução teórica em função da frequência central da antena (Porsani, 1999).	12

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Constituintes básicos de um sistema de GPR (Reynolds, 1997).	4
1.2	Relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades (Davis e Annan, 1989).	7
1.3	Relação entre atenuação e frequência em diferentes condutividades (Davis e Annan, 1989).	8
1.4	Principais processos que influenciam na perda do sinal de radar (Reynolds, 1997).	9
1.5	Variação do <i>skin depth</i> em função da resistividade do meio, para $\epsilon_r = 40$ e 8 (McCann, Jackson e Fenning, 1988).	11
1.6	a) Pulsos claramente distinguíveis; b) pulsos justapostos, mas ainda distinguíveis; e c) dois eventos coincidentes, que não são distinguíveis um do outro (Jol, 2009).	12
1.7	Velocidade da onda eletromagnética em função da porosidade para materiais granulares saturados com ar e água, onde $\epsilon_m = 6$ (Reynolds, 1997).	14
1.8	Principais técnicas de aquisição de dados de GPR: 1) Perfil de reflexão com afastamento constante; 2) Refração e reflexão de grande abertura angular (WARR); 3) Perfil de ponto médio comum (CMP); 4) Transiluminação ou tomografia (Pinto, 2007).	17
1.9	Modos de orientação das antenas de radar (Annan e Cosway, 1992).	18
1.10	Princípio do levantamento eletromagnético (Kearey, Brooks e Hill, 2009).	20
1.11	Diagrama vetorial ilustrando as relações de fase e amplitude entre os campos eletromagnéticos primário, secundário e resultante.	21
1.12	Arranjos típicos de bobinas para levantamentos eletromagnéticos: a) horizontal coplanar, b) vertical coplanar, c) perpendicular, d) vertical coaxial, e) nula, f) paralela (Borges, 2007).	23
1.13	Modos para a realização do levantamento eletromagnético: a) configuração <i>inline</i> e b) configuração <i>broadside</i>	23
2.1	Mapa de localização das travessias dos rios Quiricó Grande e Sauípe (http://maps.google.com.br) 26	
2.2	Foto do sistema RAMAC sendo deslocado sobre o terreno usando uma separação de 60 centímetros entre as antenas de 200 MHz).	26

2.3	Foto do equipamento Profiler EMP-400, onde se pode ver o instrumento eletromagnético (1) com as bobinas transmissora e receptora (a e b) e o PDA (2) que controla a aquisição.	27
2.4	Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o GPR nas margens do rio.	28
2.5	Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o método eletromagnético indutivo nas margens do rio.	29
3.1	Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o GPR nas margens do rio Quiricó Grande.	32
3.2	Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o método eletromagnético indutivo nas margens do rio Quiricó Grande.	32
3.3	Perfil 5 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.	36
3.4	Perfil 4 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.	37
3.5	Perfil 3 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.	38
3.6	Perfil 2 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.	39
3.7	Perfil 1 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.	40
3.8	Trecho 3 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas HDM <i>inline</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	41
3.9	Trecho 3 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>inline</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	42
3.10	Trecho 3 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas HDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	43

3.11	Trecho 3 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	44
3.12	Trecho 2 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	45
3.13	Trecho 1 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	46
3.14	Perfil 5 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.	50
3.15	Perfil 4 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 1000 Hz.	51
3.16	Perfil 3 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 1000 Hz.	52
3.17	Perfil 2 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 1000 Hz.	53
3.18	Perfil 1 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 1000 Hz.	54
3.19	Trecho 3 da margem esquerda do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	55
3.20	Trecho 2 da margem esquerda do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	56
3.21	Trecho 1 da margem esquerda do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	57

3.22	Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o GPR nas margens do rio Sauípe.	58
3.23	Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o método eletromagnético indutivo nas margens do rio Sauípe.	59
3.24	Foto da placa metálica que gera uma anomalia no trecho 1 com o método eletromagnético.	60
3.25	Perfis 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, feitos com a antena de GPR de 100 MHz na margem direita do Rio Sauípe.	61
3.26	Perfis 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, feitos com a antena de GPR de 200 MHz na margem direita do Rio Sauípe.	62
3.27	Trecho 1 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas HDM <i>inline</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	63
3.28	Trecho 1 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>inline</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	64
3.29	Trecho 1 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas HDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	65
3.30	Trecho 1 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	66
3.31	Trecho 2 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	67
3.32	Trecho 3 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	68
3.33	Perfis 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, feitos com a antena de GPR de 100 MHz na margem esquerda do Rio Sauípe.	70
3.34	Perfis 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, feitos com a antena de GPR de 200 MHz na margem esquerda do Rio Sauípe.	71

3.35 Trecho 1 da margem esquerda do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM <i>broadside</i> . São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.	72
---	----

INTRODUÇÃO

Os métodos geofísicos são muito importantes para a engenharia geotécnica e podem ser utilizados para diversas finalidades. Uma das aplicações é detectar e inferir a profundidade de dutos e tubulações enterradas.

Este trabalho emprega os métodos GPR e indução eletromagnética para detectar dutos metálicos enterrados.

O Radar de Penetração no Solo ou GPR (*Ground Penetrating Radar*) é uma técnica geofísica não invasiva que utiliza ondas eletromagnéticas na faixa de frequência entre 10 a 2500 MHz e é utilizada para investigação geofísica rasa e aplicações na engenharia.

A utilização de ondas eletromagnéticas de alta frequência para detectar objetos metálicos, como navio ou trem, é atribuída ao inventor alemão Christian Hulsmeyer em 1904. A primeira descrição sobre a investigação de objetos soterrados foi realizada no trabalho de Leimbach e Lowy (1910), empregando a transmissão de ondas eletromagnéticas contínuas. Em 1926, Hulsbeck utilizou o radar com pulsos eletromagnéticos para investigação da subsuperfície.

O GPR foi aperfeiçoado pelo exército dos EUA durante a guerra do Vietnã para localizar labirintos de túneis construídos no subsolo, que eram utilizados pelos vietnamitas. Após a guerra do Vietnã, em 1972, a empresa americana Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) começou a vender os primeiros sistemas comerciais de GPR. Atualmente outras empresas fabricam e comercializam sistemas de GPR, entre elas a sueca Mala Geoscience, a canadense PulseEKKO (Sensor & Software Ltd) e a italiana IDS.

O método eletromagnético foi desenvolvido durante a década de 1920 na Escandinávia, Estados Unidos e Canadá, com o objetivo de detectar depósitos condutivos de metais base. A técnica de prospecção eletromagnética é muito utilizada na exploração mineral e apresenta boa resposta com bons condutores elétricos em baixa profundidade.

Os métodos eletromagnéticos não têm sido muito empregados em trabalhos de engenharia civil, embora sejam usados para localizar tubulações e cabos enterrados, para a detecção de minas terrestres e para mapear áreas superficiais de infiltração por contaminantes (Telford et al., 1990).

A integração de métodos geofísicos é muito importante, tendo como objetivos solucionar ambiguidades e obter variados parâmetros de propriedades físicas do objeto em estudo para

uma melhor e mais completa interpretação dos dados.

O objetivo deste trabalho é utilizar os métodos de GPR e eletromagnético raso para localizar dutos de hidrocarboneto, situados na faixa de dutos do GASEB (Gasoduto Sergipe-Bahia) que fica localizado no litoral norte da Bahia e litoral de Sergipe.

No capítulo 1 deste trabalho é abordada a fundamentação teórica dos métodos geofísicos utilizados, que envolve os conceitos básicos, princípios de funcionamento e métodos de aquisição de dados. No capítulo 2 são abordados itens como a localização da área de estudo, equipamentos utilizados, forma de aquisição e processamento de dados. No capítulo 3 são apresentados os resultados obtidos e por fim são apresentadas as conclusões do trabalho no capítulo 4.

CAPÍTULO 1

Fundamentação teórica

1.1 Princípios e teoria do método GPR

O Radar de Penetração no Solo ou GPR (*Ground Penetrating Radar*) é uma técnica geofísica não invasiva que utiliza ondas eletromagnéticas na faixa de frequência entre 10 a 2500 MHz e é utilizada para investigação geofísica rasa e aplicações na engenharia.

1.1.1 Equipamento e funcionamento do radar

O sistema de GPR é composto por uma fonte geradora de pulsos elétricos de alta frequência, uma antena transmissora, uma antena receptora e uma unidade de armazenamento de dados (CPU). A CPU além de armazenar os dados tem a utilidade de realizar pré-processamento e visualização dos dados em campo.

Como mostrado na figura 1.1, a fonte geradora produz um pulso de curta duração e alta voltagem, que é aplicado na antena transmissora. A antena transmissora emite a onda eletromagnética para o subsolo e parte da onda é refletida quando existir contraste de propriedades físicas. A antena receptora detecta este sinal refletido, que é amostrado, digitalizado e armazenado. O sinal detectado é gravado como a amplitude do sinal em função do seu tempo de percurso, que é o tempo que a onda eletromagnética leva desde a saída da antena transmissora até ser detectada na antena receptora. O dado gravado é posteriormente processado e visualizado na unidade de CPU.

Na seção do GPR são registradas duas ondas diretas, a primeira a chegar é a onda direta que viaja pelo ar e a segunda é a onda direta que viaja pelo chão. Normalmente, depois das duas ondas diretas são detectadas as ondas refletidas em interfaces e difratadas por pequenos corpos.

1.1.2 Equações de Maxwell

Como o GPR utiliza a transmissão e detecção de ondas eletromagnéticas sua base teórica é fundamentada pelas equações de Maxwell, que descrevem o comportamento dos fenômenos

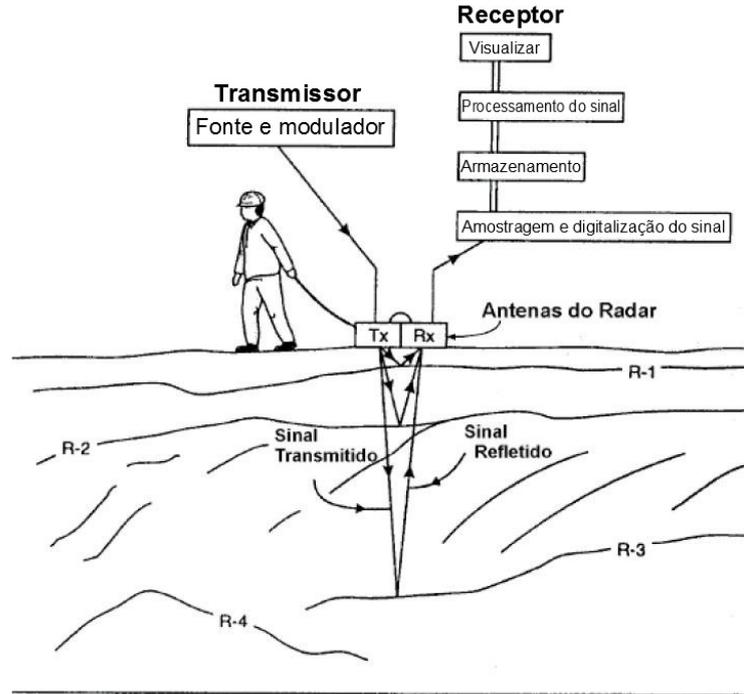


Figura 1.1: Constituintes básicos de um sistema de GPR (Reynolds, 1997).

eletromagnéticos. Para meios magnéticos e/ou polarizáveis as equações de Maxwell são:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.4)$$

onde \vec{E} é o vetor campo elétrico (V/m); \vec{B} é o vetor indução magnética (T); \vec{J} é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m^2); \vec{D} é o vetor deslocamento elétrico (C/m^2); \vec{H} é o vetor campo magnético (A/m); ρ é a densidade de carga elétrica (C/m^3); e t é o tempo (s);

1.1.3 Relações constitutivas

As relações constitutivas descrevem a resposta dos campos eletromagnéticos nos materiais e fornecem uma descrição macroscópica (ou comportamento médio) de como os elétrons, átomos e moléculas respondem com a aplicação de um campo eletromagnético. São três as relações constitutivas:

1. Relação entre densidade de corrente elétrica e condutividade:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.5)$$

Essa relação é chamada de lei de Ohm e descreve o fluxo de cargas livres em um material com condutividade σ que está sob a influência de um campo elétrico. A condutividade elétrica é expressa por S/m e representa a capacidade de um material em conduzir corrente elétrica.

2. Relação entre deslocamento elétrico e campo elétrico:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (1.6)$$

A permissividade dielétrica ε caracteriza o deslocamento de cargas ligadas na estrutura de um material que está sob a influência de um campo elétrico. A aplicação de um campo elétrico em um material provoca um deslocamento de cargas que resulta no armazenamento de energia no material. Quando este campo elétrico é removido, as cargas voltam para suas posições de equilíbrio, liberando a energia. A permissividade relativa ou constante dielétrica é definida como:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1.7)$$

onde ε_0 é a permissividade dielétrica do vácuo, que tem o valor $\varepsilon_0 = 8,89 \times 10^{-12} F/m$.

3. Relação entre indução magnética e campo magnético:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.8)$$

A permeabilidade magnética μ descreve como o momento magnético dos átomos e das moléculas responde a um campo magnético.

A condutividade elétrica, a permissividade dielétrica e a permeabilidade magnética são quantidades tensoriais e podem ser não lineares. Para o GPR os meios são considerados como homogêneos isotrópicos e lineares, por este motivo essas propriedades são tratadas como quantidades escalares e independentes do campo eletromagnético aplicado no material.

1.1.4 Parâmetros de propagação de ondas eletromagnéticas

Os fatores que descrevem a propagação das ondas de GPR são a velocidade de propagação e a atenuação. Estes fatores dependem das propriedades elétricas do meio, principalmente da constante dielétrica e condutividade.

Para a frequência de operação do radar, que é normalmente de 10 a 1000 MHz, as propriedades de deslocamento elétrico (polarização) predominam sobre as propriedades condutivas

para a maioria dos materiais geológicos, por isso a constante dielétrica é utilizada para descrever a propagação de ondas do radar. A função dielétrica complexa (ou permissividade relativa) é dada por (Davis e Annan, 1989):

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' + i\varepsilon_r''' \quad (1.9)$$

onde ε_r' é a parte real e ε_r''' é a parte imaginária da função dielétrica. A parte imaginária da função dielétrica está relacionada com as perdas de energia durante a propagação da onda eletromagnética.

Separando ε_r''' em seus componentes de alta frequência e condutividade D.C. (condutividade de corrente contínua), a função dielétrica pode ser escrita como:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' + i \left[\varepsilon_r'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega\varepsilon_0} \right] \quad (1.10)$$

onde σ_{dc} é a condutividade D.C. (S/m), ω é a frequência angular ($2\pi f$), ε_0 é a permissividade dielétrica do vácuo ($8,89 \times 10^{-12} F/m$) e ε_r'' é um termo dependente da frequência que está relacionado com as perdas associadas ao fenômeno de relaxação.

A velocidade da onda eletromagnética em meios materiais é dada por (Reynolds, 1997):

$$v = \frac{c}{\left[\frac{\mu_r \varepsilon_r}{2} (\sqrt{1 + P^2} + 1) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.11)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \times 10^8 m/s$), μ_r é a permeabilidade magnética relativa, ε_r é a permissividade dielétrica relativa e P é o fator de perda dado por:

$$P = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (1.12)$$

onde σ é a condutividade elétrica, ω é a frequência angular e ε é a permissividade dielétrica.

Para materiais geológicos não magnéticos e com baixa perda, ou seja, materiais resistivos, temos que $\mu_r \approx 1$, $P \approx 0$ e $\varepsilon_r = \varepsilon_r'$, então a velocidade da onda eletromagnética se reduz a:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r'}} \quad (1.13)$$

onde ε_r' é a parte real da função dielétrica (ou constante dielétrica).

Em um meio com baixo fator de perda, a atenuação da onda de radar é dada por (Davis e Annan, 1989):

$$\alpha = \frac{1,69 \times 10^3 \sigma}{\sqrt{\varepsilon_r'}} dB/m \quad (1.14)$$

onde $\sigma = \sigma_{dc} + \omega\varepsilon_r''\varepsilon_0$ está associado com as perdas devido a condutividade de corrente contínua (D.C.) e com as perdas dielétricas.

Material	ϵ'_r	$\sigma(mS/m)$	$v(m/ns)$	$\alpha(dB/m)$
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,01	0,033	2×10^{-3}
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3×10^4	0,01	10^3
Areia seca	3 - 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 - 30	0,1 - 1,0	0,06	0,03 - 0,3
Calcário	4 - 8	0,5 - 2	0,12	0,4 - 1
Folhelho	5 - 15	1 - 100	0,09	1 - 100
Silte	5 - 30	1 - 100	0,07	1 - 100
Argila	5 - 40	2 - 1000	0,06	1 - 300
Granito	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Sal seco	5 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Gelo	3 - 4	0,01	0,16	0,01

Tabela 1.1: Valores de constante dielétrica (ϵ'_r), condutividade elétrica(σ), velocidade (v) e atenuação (α)para alguns materiais geológicos a 100 MHz (Davis e Annan, 1989).

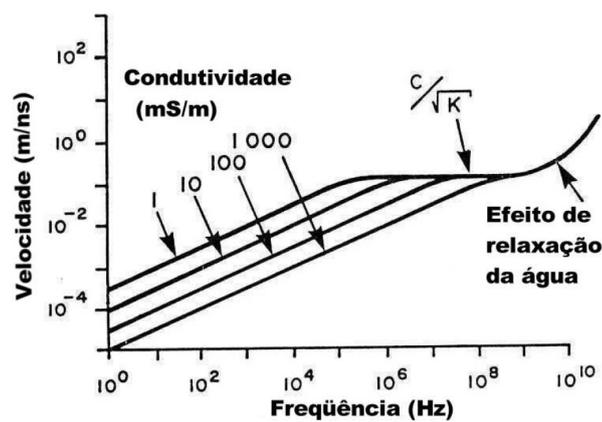


Figura 1.2: Relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades (Davis e Annan, 1989).

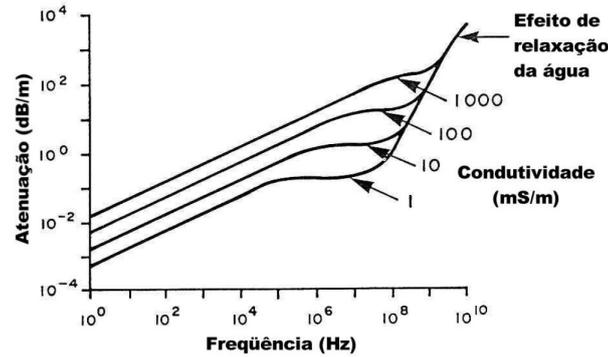


Figura 1.3: Relação entre atenuação e frequência em diferentes condutividades (Davis e Annan, 1989).

De acordo com a tabela 1.1 a constante dielétrica da água é 80 e para a maioria dos materiais geológicos secos apresentam valores entre 4 e 8. Por causa desta diferença a velocidade do sinal de radar é fortemente dependente do conteúdo de água na rocha.

A figura 1.2 mostra a relação entre a velocidade da onda eletromagnética e a frequência para diferentes condutividades. Nota-se que a velocidade permanece constante para as condutividades menores que 100 mS/m e entre 10 e 1000 MHz, que é a faixa de frequência de operação do radar. A velocidade aumenta para frequências maiores do que 1000 MHz por causa da relaxação da molécula de água. Como a velocidade permanece essencialmente constante para a faixa de frequência do radar, o sinal não é disperso pela dependência da velocidade com a frequência (Davis e Annan, 1989).

A figura 1.3 mostra a relação entre atenuação e frequência para materiais com diferentes condutividades e com constante dielétrica igual a 4. Para a faixa de frequência do radar (de 10 a 1000 MHz) a atenuação permanece essencialmente constante para diferentes condutividades. A atenuação cresce muito rapidamente para frequências acima de 100 MHz por causa do efeito de relaxação da água. O efeito de relaxação da molécula de água é a absorção da energia da onda eletromagnética pela molécula de água e é mais forte com o aumento da frequência até o valor de relaxação, que é 10 GHz.

1.1.5 Perdas de energia, atenuação e profundidade de penetração do sinal

A perda de energia influencia diretamente na profundidade de penetração do sinal do radar e os fatores que causam essa perda devem ser analisados com objetivo em obter bons resultados. A figura 1.4 mostra os principais processos de perda de energia do sinal de radar.

A atenuação da onda de radar é um dos principais fatores de perda de energia e depende da frequência do sinal de radar, da condutividade, da constante dielétrica e da permeabilidade magnética do meio. Normalmente a atenuação aumenta com o aumento da condutividade

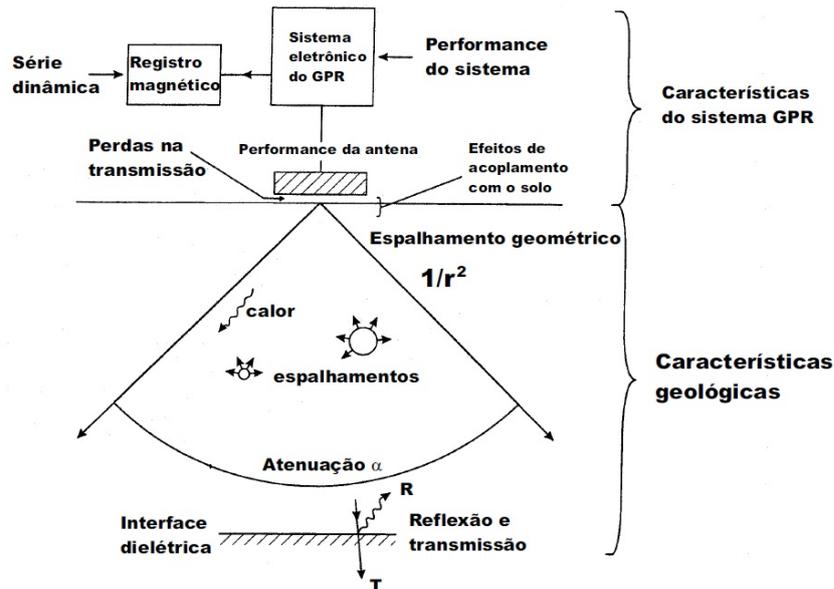


Figura 1.4: Principais processos que influenciam na perda do sinal de radar (Reynolds, 1997).

da rocha e com o aumento da frequência do sinal.

O espalhamento geométrico é uma fonte de perda de energia, pois o sinal de GPR é transmitido na forma de feixes com abertura angular em forma de cone. Com a propagação do sinal a partir do transmissor, a energia é espalhada causando uma redução de energia por unidade de área com uma taxa proporcional a $1/r^2$, onde r é a distância percorrida pelo sinal a partir da fonte.

Se existirem pequenos corpos, que são objetos com dimensão menor ou igual ao comprimento de onda do sinal de GPR, ocorrerá um espalhamento de energia de forma aleatória conhecido como difração. As difrações são fontes de ruídos nas seções de radar e apresentam-se como hipérboles de difração.

Quando o pulso de radar incide em interfaces onde existe contraste de constante dielétrica ocorre a reflexão e transmissão do sinal de GPR, ocasionando uma redução da amplitude do sinal de radar. Para uma interface plana com o sinal incidente normal à interface, o coeficiente de reflexão é dado por:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon'_{r1}} - \sqrt{\epsilon'_{r2}}}{\sqrt{\epsilon'_{r1}} + \sqrt{\epsilon'_{r2}}} \quad (1.15)$$

onde R é o coeficiente de reflexão, ϵ'_{r1} é a constante dielétrica do meio 1 e ϵ'_{r2} é a constante dielétrica do meio 2. O coeficiente de transmissão é dado por $T = 1 - R$. Quanto maior o contraste entre as interfaces maior será a quantidade de energia refletida. Se o contraste de constante dielétrica entre as camadas for muito baixo não será possível detectar a reflexão do sinal de GPR, pois neste caso a energia refletida será muito pequena.

Também ocorrem perdas de energia devido a fatores instrumentais e perdas na transmissão do sinal entre o ar e o solo.

A atenuação e os fatores de perda de energia do sinal de GPR afetam a sua profundidade de penetração. Os fatores mais importantes que afetam o alcance do sinal do radar são a performance do sistema, a atenuação do sinal e as propriedades de reflexão nas interfaces onde as propriedades elétricas variam. O alcance do sinal de radar pode ser determinado por (Davis e Annan, 1989):

$$Q = \frac{\xi_T \xi_R G_T G_R g \sigma_c e^{-4\alpha L}}{64\pi^3 f^2 L^4} \quad (1.16)$$

onde Q é a performance do sistema ou razão entre a amplitude do sinal transmitido e a mínima sensibilidade detectada, ξ_T é a eficiência da antena transmissora, ξ_R é a eficiência da antena receptora, G_T é o ganho na antena transmissora, G_R é o ganho na antena receptora, L é a distância do alvo, α é a atenuação do meio, f é a frequência, g é o ganho do retroespalhamento no alvo (*backscatter*), e σ_c é a área da seção transversal do espalhamento no alvo. A performance do sistema é uma característica do equipamento de GPR e influencia na profundidade de investigação, pois sistemas com maior valor de performance (Q) apresentam maior profundidade máxima de investigação.

O *skin depth* (δ) é definido como a profundidade na qual a amplitude do sinal é reduzida a $1/e$ ou 37% do valor inicial e é o inverso do fator de atenuação ($\delta = 1/\alpha$). Para materiais com baixo fator de perda o *skin depth* é dado por:

$$\delta = 5,31 \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{\sigma} \quad (1.17)$$

onde ε_r é a constante dielétrica do meio e σ é a condutividade elétrica do meio. Como mostrado na figura 1.5 o *skin depth* aumenta com a resistividade elétrica do meio.

A tabela 1.2 mostra a dependência da profundidade máxima de penetração em função da frequência central das antenas, com base em experimentos práticos. O sinal de GPR apresenta maior atenuação para frequências mais altas, por isso o sinal tem maior penetração para frequências mais baixas.

1.1.6 Resolução vertical e horizontal

Resolução é a medida da capacidade do sistema em detectar dois eventos próximos um do outro. A figura 1.6 mostra em (a) dois pulsos que são claramente distinguíveis, em (b) dois pulsos justapostos, mas ainda distinguíveis e em (c) dois pulsos coincidentes que resultam em eventos que não são distinguíveis entre si.

A resolução do GPR consiste em duas componentes, que são chamadas de resolução vertical e resolução horizontal.

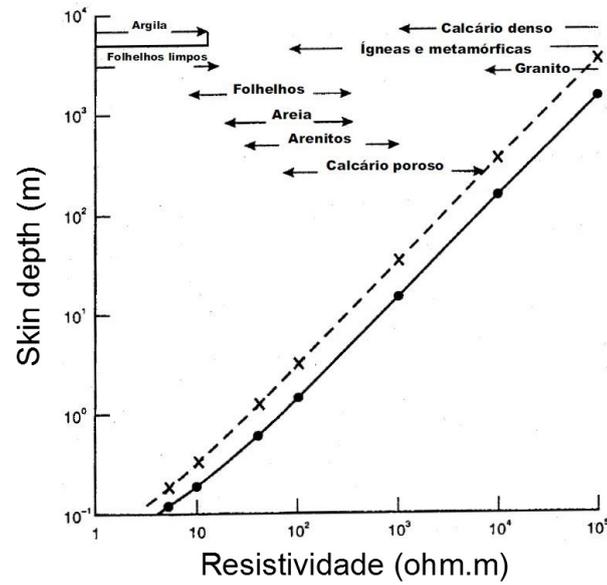


Figura 1.5: Variação do *skin depth* em função da resistividade do meio, para $\epsilon_r = 40$ e 8 (McCann, Jackson e Fenning, 1988).

Frequencia central (MHz)	Profundidade máxima de penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Tabela 1.2: Estimativa da profundidade máxima de penetração em função da frequência central das antenas (Porsani, 1999).

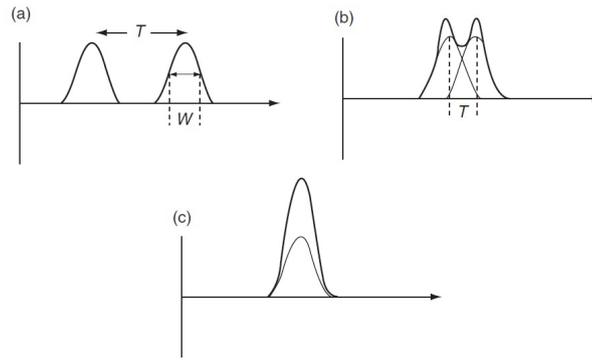


Figura 1.6: a) Pulsos claramente distinguíveis; b) pulsos justapostos, mas ainda distinguíveis; e c) dois eventos coincidentes, que não são distinguíveis um do outro (Jol, 2009).

Frequência central da antena f_c (MHz)	Resolução teórica (m)
200	0,125 - 0,25
100	0,25 - 0,5
50	0,5 - 1
25	1 - 2

Tabela 1.3: Resolução teórica em função da frequência central da antena (Porsani, 1999).

A resolução vertical é a medida da capacidade do sistema em distinguir dois sinais provenientes de refletores próximos entre si. Teoricamente a resolução vertical é dada por $\lambda/4$, onde λ é o comprimento de onda do sinal dado por:

$$\lambda = \frac{v}{f_c} \quad (1.18)$$

onde v é a velocidade do meio e f_c é a frequência central da antena de GPR. Na prática a resolução conseguida é de $\lambda/3$ a $\lambda/2$.

A resolução horizontal é a capacidade do sistema em distinguir sinais provenientes de alvos situados um ao lado do outro. Quanto maior a profundidade do alvo menor é a resolução horizontal.

A resolução do GPR aumenta com a frequência, como pode ser observado pela tabela 1.3. Os equipamentos de GPR com baixa frequência apresentam um alcance maior e uma resolução baixa, enquanto que equipamentos com alta frequência apresentam um alcance pequeno e alta resolução. Então a depender do objetivo é importante escolher uma frequência adequada, que consiga satisfazer ambos os requisitos de alcance do sinal e resolução.

1.1.7 Propriedades dielétricas das rochas

Nas aplicações de GPR variações na constante dielétrica e condutividade das rochas são importantes, enquanto que variações na permeabilidade magnética raramente são levadas em consideração.

A constante dielétrica ε_r apresenta valores que variam de 1 até 81, que são as constantes dielétricas do ar e da água, respectivamente. Para a maioria dos materiais geológicos a constante dielétrica varia entre 3 e 30 e a velocidade de propagação do radar varia de 0,07 a 0,15 m/ns . Valores característicos para a atenuação α é de 1 dB/m , para materiais com alta perda é de 10 a 100 dB/m e para materiais com baixa perda é de 0,01 a 0,1 dB/m (Jol, 2009).

Muitos materiais geológicos são formados por misturas complexas onde cada componente pode ter diferentes propriedades físicas, influenciando nas propriedades elétricas da rocha. A maioria das rochas contém poros que podem estar preenchidos com fluido, como água ou ar. A presença de água nas rochas, mesmo em quantidades muito pequenas, pode influenciar fortemente a constante dielétrica, pois a água tem o maior valor de constante dielétrica entre os materiais.

Existem vários modelos para determinar a permissividade elétrica de uma mistura. A fórmula de CRIM (*Complex refractive index model*) é um modelo usado para meios em camadas e mostra ser efetivo para meios de granulação média a grossa, que envolvem materiais granulares simples (como grãos de areia semi esférica) e fluidos com viscosidade baixa a moderada. A fórmula de CRIM é dada por (Jol, 2009):

$$\varepsilon_{mix} = \left(\sum_{i=1}^n f_i \sqrt{\varepsilon_i} \right)^2 \quad (1.19)$$

onde ε_{mix} é a permissividade elétrica da mistura, f_i é a fração do volume do i -ésimo componente e ε_i é a permissividade elétrica do i -ésimo componente. Aplicando a fórmula de CRIM para uma mistura que contém uma matriz granular, ar e água, obtém:

$$\varepsilon_{mix} = [\phi S_w \sqrt{\varepsilon_w} + (1 - \phi) \sqrt{\varepsilon_m} + \phi(1 - S_w) \sqrt{\varepsilon_a}]^2 \quad (1.20)$$

onde ϕ é a porosidade da rocha, S_w é a saturação em água, ε_w , ε_m e ε_a são as permissividades elétricas da água, matriz da rocha e ar, respectivamente.

Levando em consideração que os poros de rocha estão totalmente saturados com um fluido, que pode ser ar, água ou outro fluido, a fórmula de CRIM fica:

$$\varepsilon_{mix} = [\phi \sqrt{\varepsilon_f} + (1 - \phi) \sqrt{\varepsilon_m}]^2 \quad (1.21)$$

onde ϕ é a porosidade, ε_f e ε_m são as constantes dielétricas do fluido dos poros e da matriz de rocha, respectivamente.

Considerando a rocha como uma mistura, a velocidade de propagação da onda de radar fica:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{mix}}} \quad (1.22)$$

Sendo assim, assumindo que a rocha é composta por uma matriz e um espaço poroso totalmente preenchido por fluido e que a velocidade da onda na rocha e as constantes dielétricas da matriz e do fluido são conhecidas, podemos calcular a porosidade da rocha utilizando as fórmulas 1.22, 1.20 e 1.21.

A velocidade da onda em função da porosidade da rocha para materiais saturados com ar e água é mostrada pela figura 1.7. Observa-se que a velocidade da onda diminui com o aumento da porosidade para meios saturados em água, enquanto que para meios saturados em ar a velocidade aumenta.

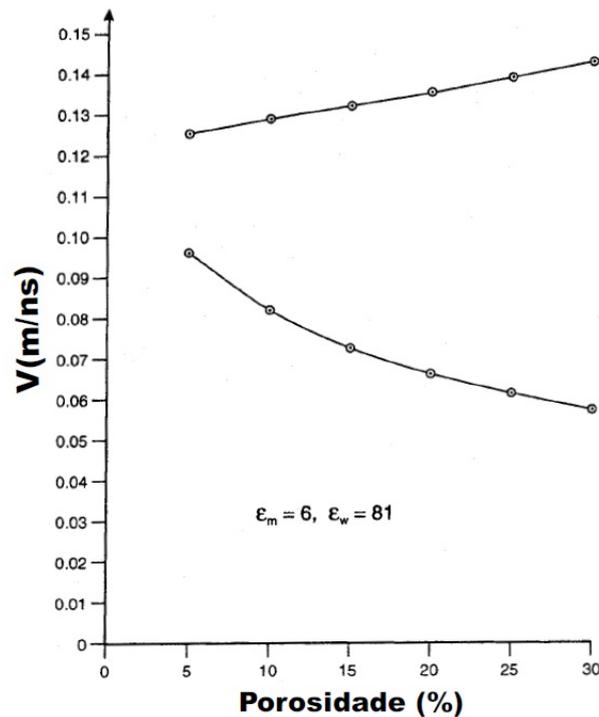


Figura 1.7: Velocidade da onda eletromagnética em função da porosidade para materiais granulares saturados com ar e água, onde $\epsilon_m = 6$ (Reynolds, 1997).

Materiais que apresentam condutividade alta, geralmente apresentam maior atenuação da onda de radar. Por isso solos ricos em argila, silte ou saturados com água salgada ou contaminantes com alta condutividade apresentam penetração do sinal de radar muito baixa.

Na maioria dos casos, para o GPR, a permeabilidade magnética é considerada como a permeabilidade magnética do espaço livre ($\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} H/m$), pois existe pouca quantidade de materiais ferromagnéticos na maioria das rochas, normalmente menos de 2%.

Quantidades apreciáveis de magnetita, maghemita e hematita (que são os principais minerais magnéticos nas rochas) podem ser encontradas em algumas rochas ígneas, areias ricas em ferro e alguns solos (Jol, 2009). Nos casos onde materiais magnéticos estão presentes nas rochas em quantidades consideráveis, pode haver um aumento considerável na permeabilidade magnética da rocha, causando uma diminuição na velocidade de propagação e um aumento na atenuação do sinal.

1.1.8 Aquisição de dados

Antes de realizar a aquisição de dados de GPR deve ser feito um planejamento, onde deve ser observada a profundidade do alvo, geologia local, contraste de propriedades elétricas dos materiais, atenuação do sinal, topografia, logística e fontes de ruídos, que podem ser cabos elétricos, estruturas metálicas, cercas ou carros.

Técnicas de aquisição de dados

Existem quatro modos para a aquisição dos dados de GPR, que são mostrados na figura 1.8: perfil de reflexão com afastamento constante, refração e reflexão de grande abertura angular ou *wide angle reflection and refraction* (WARR), ponto médio comum ou *common midpoint* (CMP) e transiluminação ou tomografia.

1. Perfil de reflexão com afastamento constante

É o modo mais utilizado para realizar medidas com GPR. Nesta técnica as antenas transmissora e receptora são mantidas a uma distância de separação fixa e são movidas na superfície. O resultado é um perfil de GPR onde no eixo vertical é mostrado o tempo duplo de viagem das ondas refletidas e no eixo horizontal são mostradas as posições das antenas no terreno. Como a separação entre as antenas são bastante pequenas, normalmente as seções podem ser consideradas como zero-offset.

2. Refração e reflexão de grande abertura angular (WARR)

Neste modo uma das antenas permanece em uma localização fixa, enquanto a outra antena é afastada lateralmente. Para realizar este tipo de perfil devem existir refletores planos e horizontais ou com inclinação pequena. Este modo de aquisição é útil para estimar a variação da velocidade do sinal com a profundidade.

3. Perfil de ponto médio comum (CMP)

As antenas transmissora e receptora são afastadas simultaneamente em sentidos opostos na mesma direção do perfil, de forma que o ponto médio entre as antenas permaneça fixo. Este modo de aquisição é utilizado para estimar como a velocidade de propagação

do sinal varia com a profundidade. A vantagem de realizar o CMP está em realizar uma análise de velocidade com maior precisão.

4. Transiluminação ou tomografia

Esta técnica é utilizada em poços, minas subterrâneas, cavernas, construção civil, inspeção de colunas de concreto e outras aplicações. As antenas transmissora e receptora são posicionadas em lados opostos do meio a ser investigado. Normalmente, uma antena é fixada em um lado de um pilar ou um poço, enquanto outra antena é movida no outro lado do pilar ou em outro poço. Com a transiluminação é possível determinar a velocidade do sinal no meio e se for possível medir amplitude do sinal é possível determinar a atenuação do meio.

Parâmetros de aquisição de dados

Os parâmetros que devem ser definidos para uma aquisição de dados são:

1. Frequência da antena: é definido levando em consideração a profundidade de exploração e resolução requeridas. Quanto maior a frequência menor é a profundidade de investigação e maior é a resolução.
2. Abertura da janela temporal (T_w): é o intervalo de tempo em que a janela de tempo deve ficar aberta para que o sinal seja transmitido, refletido e captado pela antena receptora. Para estimar a abertura da janela de tempo pode ser usada a expressão (Annan, 2001):

$$T_w = 1,3 \frac{2P_{max}}{V_{min}} \quad (1.23)$$

onde P_{max} é a profundidade máxima de investigação desejada e V_{min} é a velocidade mínima que pode ser encontrada na área do levantamento. A expressão acima aumenta o tempo estimado em 30% devido a incertezas na velocidade do meio e na profundidade de investigação.

3. Intervalo de amostragem temporal (Δt): é o intervalo entre pontos de amostragem do sinal gravado. Para não ocorrer uma falsa amostragem do sinal, deve ser obedecido o critério de amostragem de Nyquist, que é dado por:

$$\Delta t = \frac{1}{2f_N} \quad (1.24)$$

onde Δt é o intervalo de amostragem e f_N é a frequência de Nyquist, que é a frequência mais alta que será gravada. Para o GPR é mais apropriado utilizar o intervalo de amostragem sendo (Annan, 2001):

$$\Delta t = \frac{1}{6f_c} \quad (1.25)$$

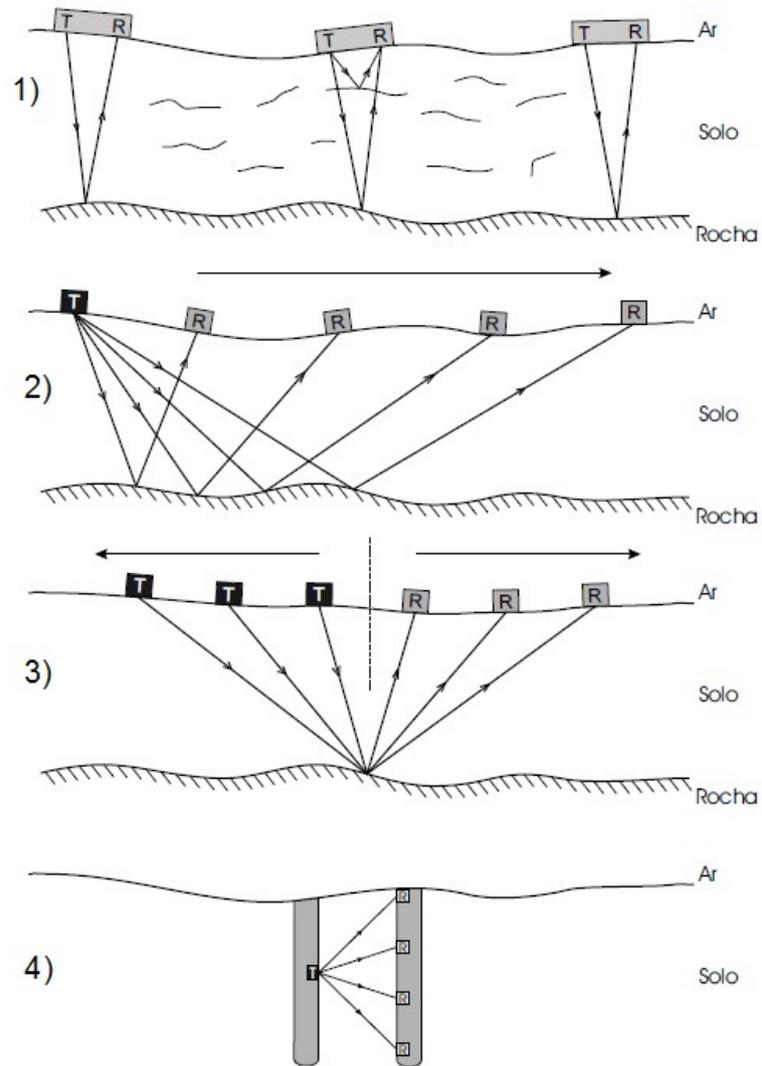


Figura 1.8: Principais técnicas de aquisição de dados de GPR: 1) Perfil de reflexão com afastamento constante; 2) Refracção e reflexão de grande abertura angular (WARR); 3) Perfil de ponto médio comum (CMP); 4) Transiluminação ou tomografia (Pinto, 2007).

onde f_c é a frequência central da antena.

4. Amostragem espacial (Δx): é o intervalo espacial entre as estações, ou seja, é o espaçamento entre os traços da seção de radar. Para evitar uma falsa amostragem o intervalo de amostragem espacial não deve exceder o intervalo de amostragem de Nyquist, que é um quarto do comprimento de onda no meio. Para o GPR o intervalo de amostragem de Nyquist é dado por (Annan, 2001):

$$\Delta x = \frac{c}{4f_c\sqrt{K}} \quad (1.26)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, f_c é a frequência central da antena e K é a constante dielétrica do meio. Se o espaçamento entre estações for maior do que o intervalo de amostragem de Nyquist, não será possível definir adequadamente refletores inclinados ou hipérbolos de difração.

5. Espaçamento entre as antenas: muitos sistemas utilizam antenas transmissora e receptora com separação fixa, dada pelo fabricante. Existem também sistemas de GPR que as antenas transmissora e receptora vêm separadas e pode ser mudado o espaçamento entre as antenas, permitindo assim realizar levantamentos CMP e WARR. Em levantamentos de afastamento constante normalmente utiliza o espaçamento igual ao comprimento da antena.
6. Orientação do perfil: normalmente os perfis são orientados perpendicularmente às estruturas em subsuperfície que se deseja imagear.
7. Orientação das antenas: na figura 1.9 são mostradas várias formas de orientar as antenas do radar. Normalmente é utilizada a configuração PR-BD, onde as antenas são orientadas perpendicularmente à direção do perfil. Se o objetivo do levantamento for a estratigrafia, a configuração ideal é a PR-BD, pois minimiza os efeitos de estruturas fora do plano do perfil. Para a detecção de objetos enterrados a configuração PL-BD é a mais apropriada, pois apresenta maior área de recobrimento fora do plano do perfil, aumentando a probabilidade de atingir o alvo.

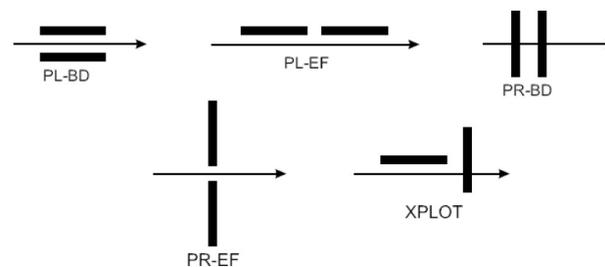


Figura 1.9: Modos de orientação das antenas de radar (Annan e Cosway, 1992).

1.1.9 Aplicações para o método GPR

As aplicações do GPR podem ser agrupadas em três linhas de pesquisa baseada nas frequências das antenas. Frequências abaixo de 200 MHz são geralmente usadas na geologia, onde a profundidade de investigação é mais importante do que uma resolução muito boa, frequências entre 200 e 400 MHz atende às investigações geotécnicas e de meio ambiente, já as frequências acima de 400 MHz são mais utilizadas na engenharia civil, onde é necessária uma boa resolução em detrimento da profundidade de investigação.

Estão listadas abaixo as principais aplicações do método GPR (Reynolds, 1997):

- **Geologia / Geofísica:** detecção de fissuras e cavidades naturais; mapeamento de subsidências; mapeamento da geometria de arcabouços arenosos; mapeamento de depósitos superficiais; mapeamento estratigráfico; estudos geológicos glaciais; exploração mineral e avaliação de recursos; mapeamento da espessura de camadas; estudos do Permafrost; localização de cunhas de gelo; mapeamento de fraturas em rochas de sal; mapeamento de estruturas geológicas; localização de falhas, diques, intrusões, etc.; mapeamento da camada de sedimentos em lagos e rios;
- **Ambiental:** mapeamento de plumas de contaminação; mapeamento e monitoração de contaminantes no lençol freático; investigações em aterros sanitários e lixões; localização de tanques de combustível enterrados; localização de dutos de gás, água e energia; investigações hidrogeológicas;
- **Glaciologia:** determinação da espessura das camadas de gelo; determinação da estrutura interna das geleiras; estudo da movimentação das geleiras; localização das zonas condutoras de água dentro das geleiras; determinação do tipo de gelo (marinho ou lacustre); determinação do balanço de massa sub-glacial; mapeamento da estratigrafia;
- **Engenharia e construção civil:** análise de asfaltos; localização de vazios em subsuperfície; localização de vigas; localização de dutos e cabos; testes não destrutivos em materiais; testes de qualidade de concretos;
- **Arqueologia:** localização de artefatos enterrados; localização da infra estrutura de antigas civilizações; mapeamento pré-escavação; localização de criptas e tumbas;
- **Forense:** localização de corpos e objetos enterrados.

Algumas aplicações do GPR podem ser vistas nos trabalhos de Harrison (1970), Campbell e Orange (1974) e Annan e Davis (1976) na determinação das espessuras das camadas de gelo da Antártica e do Ártico; Thierbach (1974) e Unterberger (1978) para detectar fraturas em rochas de sal; Bevan e Kenyon (1975) em investigações arqueológicas; Coon, Fowler e Shafers (1981) para investigações em corpos de carvão; Davis, Annan e Vaughan (1985) na

exploração de depósitos de placer; Darracott e Lake (1981), Ulriksen (1982), Leggo e Leech (1983) e Davis e Annan (1989); Botelho (2007) e Botelho (2008) na prospecção de manganês; Botelho e Jorge (2005) na avaliação das subestruturas de uma ferrovia; Jaya et al. (1999) e Pestana e Botelho (1997) na utilização da migração no processamento de dados; entre outros, na engenharia civil e na solução de problemas geológicos.

1.2 Princípios e teoria do método eletromagnético indutivo

Os métodos eletromagnéticos utilizam bobinas para a transmissão e detecção de campo eletromagnético. É aplicada uma corrente elétrica alternada na bobina transmissora, gerando assim o campo eletromagnético primário que viaja pelo ar e pela subsuperfície, como pode ser visto na figura 1.10. Na presença de corpos condutores, a parte do campo eletromagnético que viaja através do solo induz correntes elétricas alternadas ou correntes parasitas nesses corpos. Essas correntes parasitas criam campos magnéticos secundários que se propagam até a bobina receptora, onde é detectada a resultante dos campos primários e secundários. Os campos primários e secundários apresentam a mesma frequência e diferem em fase e amplitude, sendo que essas diferenças revelam a presença do condutor e fornecem informações sobre sua geometria e propriedades elétricas. Todos os corpos com alta condutividade geram fortes campos eletromagnéticos secundários, sendo assim este método é sensível à condutividade dos materiais geológicos.

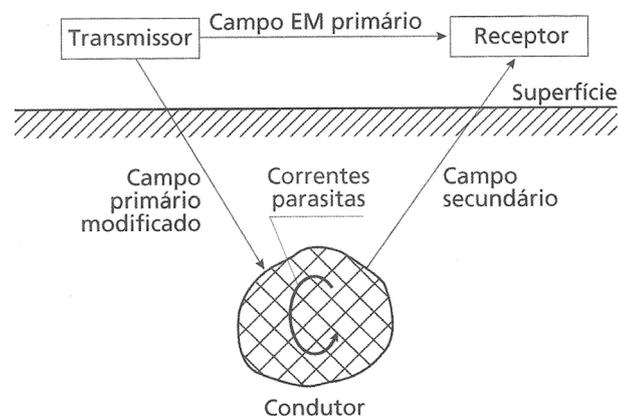


Figura 1.10: Princípio do levantamento eletromagnético (Kearey, Brooks e Hill, 2009).

As relações de fase podem ser mostradas através da figura 1.11, onde o comprimento do vetor representa a amplitude do campo e o ângulo medido em sentido anti-horário, do vetor de campo primário para o vetor de campo secundário, representa o atraso angular de fase do campo secundário em relação ao campo primário, que é $\pi/2 + \phi$.

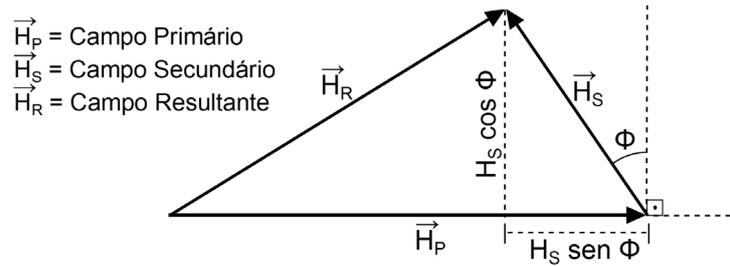


Figura 1.11: Diagrama vetorial ilustrando as relações de fase e amplitude entre os campos eletromagnéticos primário, secundário e resultante.

O campo primário propaga-se diretamente da bobina transmissora para a bobina receptora através do ar sofrendo apenas uma pequena redução na amplitude, causada pelo espalhamento geométrico, mas sem apresentar modificação na fase. Quando o campo primário penetra no solo sua amplitude é reduzida, mas permanece em fase com o campo primário que propaga acima da superfície. O campo primário induz uma voltagem alternada em um condutor em subsuperfície com a mesma frequência, mas com um atraso de fase de $\pi/2$, de acordo com as leis da indução eletromagnética. As propriedades elétricas do condutor causam mais um atraso de fase dado por (Kearey, Brooks e Hill, 2009):

$$\phi = \arctan\left(\frac{2\pi fL}{r}\right) \quad (1.27)$$

onde f é a frequência do campo eletromagnético, L é a indutância do condutor (que é sua tendência de opor-se a uma mudança no campo aplicado), e r a resistência do condutor. Para um bom condutor ϕ se aproximará de $\pi/2$, enquanto que para uma mau condutor ϕ será quase zero. O efeito resultante é que o campo secundário se atrasa em relação ao campo primário com um ângulo de fase de $\pi/2 + \phi$.

A projeção do campo secundário S na direção do campo primário (eixo horizontal) é $S \cos \phi$ e é conhecida como a componente em fase (*in-phase component*) ou componente real do campo secundário. A projeção do campo secundário S na direção perpendicular ao campo primário (eixo vertical) é $S \sin \phi$ e é conhecida como a componente fora de fase, imaginária ou em quadratura (*out-of phase, imaginary or quadrature component*).

Os instrumentos modernos são capazes de separar o campo eletromagnético secundário em suas componentes real (Re) e imaginária (Im). Quanto maior a razão Re/Im melhor é o condutor.

Para realizar uma aquisição de dados eletromagnéticos primeiro é realizada uma calibração do equipamento, que é uma leitura sobre terreno estéril para ajustar a posição do zero. Desta forma o sistema responde apenas aos campos secundários.

Os dados obtidos no levantamento eletromagnético são as componentes do campo secundário (em fase e em quadratura), que são geralmente apresentadas como uma porcentagem do campo eletromagnético primário.

1.2.1 Profundidade de penetração dos campos eletromagnéticos

Os campos eletromagnéticos são atenuados exponencialmente durante a propagação através de um meio. O *skin depth* é definido como a profundidade na qual a amplitude do campo é reduzida pelo fator de $1/e$ da amplitude inicial e é dado por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (1.28)$$

onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, f é a frequência do campo eletromagnético, σ é a condutividade do meio e μ é a permeabilidade magnética. O número de indução (η) é dado por:

$$\eta = \frac{s}{\delta} \quad (1.29)$$

onde s é a separação entre as bobinas transmissora e receptora e δ é o *skin depth*.

Pode ser definida empiricamente uma profundidade de penetração efetiva (Z_e), que é a profundidade máxima na qual um condutor pode se situar e produzir uma anomalia eletromagnética detectável, que é dada por (Kearey, Brooks e Hill, 2009):

$$Z_e \approx \frac{100}{\sqrt{\sigma f}} \quad (1.30)$$

Nota-se que a profundidade de penetração de um campo eletromagnético aumenta com a diminuição da frequência do campo e com a diminuição da condutividade, dessa forma a frequência pode ser escolhida de acordo com a profundidade de investigação desejada em um determinado meio. A separação entre as bobinas transmissora e receptora também influencia na profundidade de investigação, sendo que o aumento da separação entre as bobinas provoca um aumento na profundidade de investigação.

1.2.2 Arranjos de bobinas

Nos sistemas de duas bobinas podem ser utilizadas várias formas de orientação das bobinas transmissora e receptora. Na figura 1.12 são mostrados os arranjos de bobinas mais utilizados, que são o horizontal coplanar, vertical coplanar, perpendicular, vertical coaxial, nula e paralela. O arranjo horizontal coplanar também é conhecido como *Vertical Dipole Moment* (VDM), que quer dizer momento de dipolo vertical, e o arranjo vertical coplanar também é conhecido como *Horizontal Dipole Moment* (HDM), que quer dizer momento de dipolo horizontal.

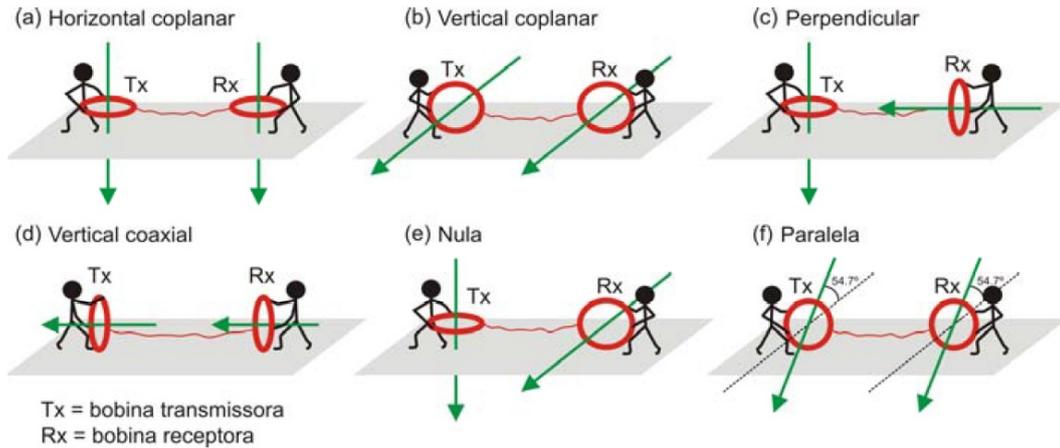


Figura 1.12: Arranjos típicos de bobinas para levantamentos eletromagnéticos: a) horizontal coplanar, b) vertical coplanar, c) perpendicular, d) vertical coaxial, e) nula, f) paralela (Borges, 2007).

Existem duas formas de realizar a aquisição de dados com um arranjo fixo de bobinas sendo transportadas ao longo de um perfil, como mostra a figura 1.13. A configuração *inline* é realizada transportando o arranjo de bobinas de forma que a linha que une o centro das bobinas transmissora e receptora fique na direção do perfil. A configuração *broadside* é feita transportando o arranjo de bobinas de forma que a linha que une o centro das bobinas transmissora e receptora fique na direção perpendicular ao perfil.

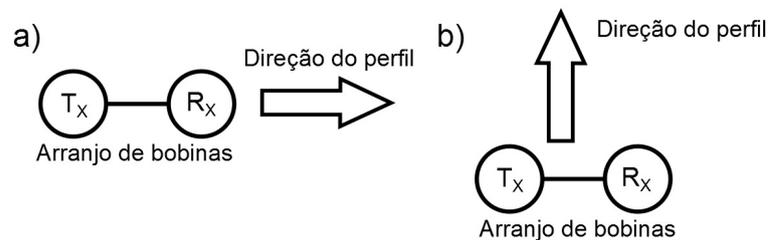


Figura 1.13: Modos para a realização do levantamento eletromagnético: a) configuração *inline* e b) configuração *broadside*.

No levantamento de dados as leituras são realizadas deslocando o arranjo de bobinas em espaçamentos regulares do perfil.

As medidas obtidas com os arranjos horizontal coplanar (HCP) e vertical coplanar (VCP) são dadas por (Keller e Frischknecht, 1966):

$$\left(\frac{H_S}{H_P}\right)_{HCP} = \frac{2}{(\gamma s)^2} \{9 - [9 + 9\gamma s + 4(\gamma s)^2 + (\gamma s)^3]e^{-\gamma s}\} \quad (1.31)$$

$$\left(\frac{H_S}{H_P}\right)_{VCP} = \frac{2}{(\gamma s)^2} \{-3 + (\gamma s)^2 + [3 + 3\gamma s + (\gamma s)^2]e^{-\gamma s}\} \quad (1.32)$$

onde H_S e H_P são os campos magnéticos primário e secundário, respectivamente, $\gamma = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ é o número de onda e s é a separação entre as bobinas transmissora e receptora.

1.2.3 Condutividade aparente

Quando o número de indução é muito menor do que 1, a parte imaginária (ou em quadratura) da razão entre os campos primário e secundário pode ser dado por:

$$\text{Im} \left\{ \frac{H_S}{H_P} \right\} \approx \frac{\omega\mu\sigma s^2}{4} \quad (1.33)$$

onde esta equação é válida para os dois arranjos de bobinas, que são os arranjos horizontal coplanar e vertical coplanar. Desta forma temos que a componente em quadratura da razão H_S/H_P é proporcional à condutividade do solo, então se pode calcular uma resistividade aparente do solo (σ_a), que é dado por:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu\sigma s^2} \text{Im} \left\{ \frac{H_S}{H_P} \right\} \quad (1.34)$$

A condutividade aparente dada por esta fórmula é válida para os arranjos de bobinas horizontal coplanar e vertical coplanar. Essa relação permite a construção de equipamentos que fornecem uma leitura direta da condutividade do solo até certa profundidade.

1.2.4 Aplicações para o método eletromagnético indutivo

A técnica de prospecção eletromagnética é muito utilizada na exploração mineral e apresenta boa resposta com bons condutores elétricos em baixa profundidade. O método eletromagnético indutivo também é utilizado em trabalhos de geologia, engenharia, ambiental, arqueologia, agricultura de precisão e água subterrânea.

Algumas aplicações do método são: mapeamento de solos rasos, mapeamento da salinidade do solo, investigações de água subterrânea, detecção e mapeamento de contaminantes em subsuperfície, detecção de meios geológicos condutivos, detecção de depósitos minerais ferrosos, investigações arqueológicas com o objetivo de detectar estruturas enterradas em baixas profundidade e detecção de objetos metálicos condutivos, como tambores, tanques, minas terrestres, tubulações metálicas, entre outros.

CAPÍTULO 2

Metodologia

A primeira etapa do trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica envolvendo os métodos geofísicos utilizados e leitura dos manuais de operação dos equipamentos. Foram realizados também testes com o Profiler EMP-400 com o objetivo de aprender a operar o sistema.

Na segunda etapa foi realizada a aquisição de dados em campo, que foi feita entre os meses de agosto e novembro de 2011. Para esta fase a empresa GPR Geoscience foi contratada para dar suporte ao projeto. O radar RAMAC é de propriedade desta empresa e foi cedido para esta pesquisa.

Na terceira etapa foi feito o processamento e a interpretação dos dados.

2.1 Localização da área de estudo

A área de estudo é a faixa de dutos GASEB (Gasoduto Sergipe-Bahia), de domínio da Transpetro, que fica localizado no litoral da Bahia e litoral de Sergipe.

Foram adquiridos dados nas margens do rio Quiricó Grande e do rio Sauípe, localizados no litoral norte da Bahia, conforme mostra a figura 2.1.

2.2 Equipamentos utilizados

Neste trabalho o sistema de GPR utilizado foi o RAMAC e o equipamento do método eletromagnético indutivo utilizado foi o Profiler EMP-400.

2.2.1 Sistema RAMAC

Este sistema é fabricado pela empresa sueca Mala Geoscience e consiste de antenas receptora e transmissora não blindadas, unidade de controle e um notebook para armazenar e visualizar os dados. As antenas e a unidade de controle são interligadas por cabos de fibra ótica e o



Figura 2.1: Mapa de localização das travessias dos rios Quiricó Grande e Sauípe (<http://maps.google.com.br>).

notebook é conectado por um cabo serial. Foram utilizadas neste sistema antenas com frequências de 100, 200 e 400 MHz.



Figura 2.2: Foto do sistema RAMAC sendo deslocado sobre o terreno usando uma separação de 60 centímetros entre as antenas de 200 MHz).

2.2.2 Profiler EMP-400

Neste trabalho o equipamento utilizado para o método eletromagnético indutivo foi o Profiler EMP-400 do fabricante GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc). O Profiler EMP-400 é um sistema portátil que opera no domínio da frequência. Este equipamento pode coletar dados de até 3 frequências simultaneamente e o usuário pode escolher frequências entre 1 e 16 KHz em

incrementos de 1 KHz. As configurações de bobinas que podem ser utilizadas são a horizontal coplanar (HCP) e vertical coplanar (VCP), conhecidas também como *Vertical Dipole Moment* (VDM) e *Horizontal Dipole Moment* (HDM), e podem ser realizados levantamentos *inline* e *broadside*. O espaçamento entre as bobinas é fixo e seu valor é de 121.9 centímetros.

Os dados gravados pelo equipamento consistem nos componentes em fase e quadratura do campo magnético secundário com relação ao campo primário, dado em PPM (partes por milhão). O sistema também fornece a condutividade aparente do meio (σ_a) em mS/m para a frequência de 15 KHz. A aquisição é feita em forma de uma malha bidimensional e o sistema fornece uma visualização dos dados em mapa.

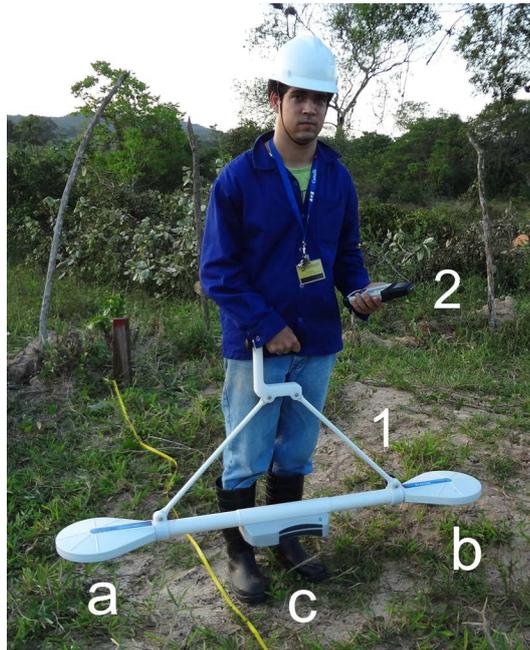


Figura 2.3: Foto do equipamento Profiler EMP-400, onde se pode ver o instrumento eletromagnético (1) com as bobinas transmissora e receptora (a e b) e o PDA (2) que controla a aquisição.

Como mostrado pela figura 2.3 o sistema consiste em duas partes, que são:

1. Instrumento eletromagnético que é composto pela bobina transmissora (a), pela bobina receptora (b) e pela parte eletrônica do instrumento (c);
2. PDA (*Personal Digital Assistant*) que controla a aquisição e gravação de dados, permitindo também uma pré-visualização dos dados em campo.

O PDA possui um sistema de GPS integrado que pode ser usado nos levantamentos de dados. O PDA se comunica com o sistema através de uma conexão *Bluetooth*[®], não sendo necessário o uso de cabos.

Antes de coletar os dados o sistema realiza calibrações para compensar a presença do operador e para compensar as condições de ruídos do local.

2.3 Aquisição de dados

Foram feitos perfis de GPR orientados perpendicularmente aos dutos e localizados dentro da faixa. Em cada margem dos rios foram realizados cinco perfis de GPR, sendo o primeiro localizado o mais perto possível do rio e os outros quatro perfis foram feitos paralelos ao primeiro e distanciados de 10, 20, 30 e 50 metros do primeiro perfil, como ilustrado pelo croqui da figura 2.4. Os perfis foram feitos com o comprimento de 30 metros. Em alguns locais não foi possível realizar perfis com este comprimento por causa da existência de barrancos, regiões alagadas ou vegetação e por isso nestes casos foram feitos perfis com tamanho menor.

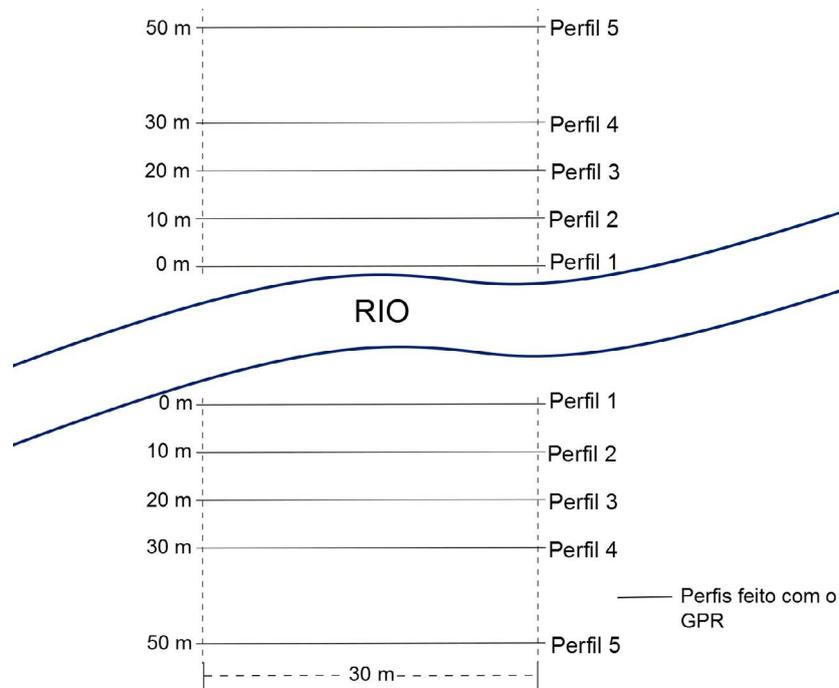


Figura 2.4: Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o GPR nas margens do rio.

Os dados coletados com o sistema RAMAC foram obtidos com antenas de GPR com frequências de 100, 200 e 400 MHz, o modo de aquisição foi o de afastamento constante, o espaçamento entre as medidas foi de 5 centímetros e a separação das antenas foi de 1 metro para a antena de 100 MHz e de 60 centímetros para as antenas de 200 e 400 MHz.

Foram realizados levantamentos com o Profiler EMP-400 apenas em alguns trechos das margens dos rios, que foram de 0 a 10 metros (trecho 1), de 20 a 30 metros (trecho 2) e de 40

a 50 metros (trecho 3) da margem dos rios, como mostra a figura 2.5. As linhas foram feitas perpendicularmente aos dutos, com 30 metros de comprimento e espaçadas de 2 metros, nos trechos que foram adquiridos os dados. Em cada linha foram feitas medidas a cada 50 centímetros.

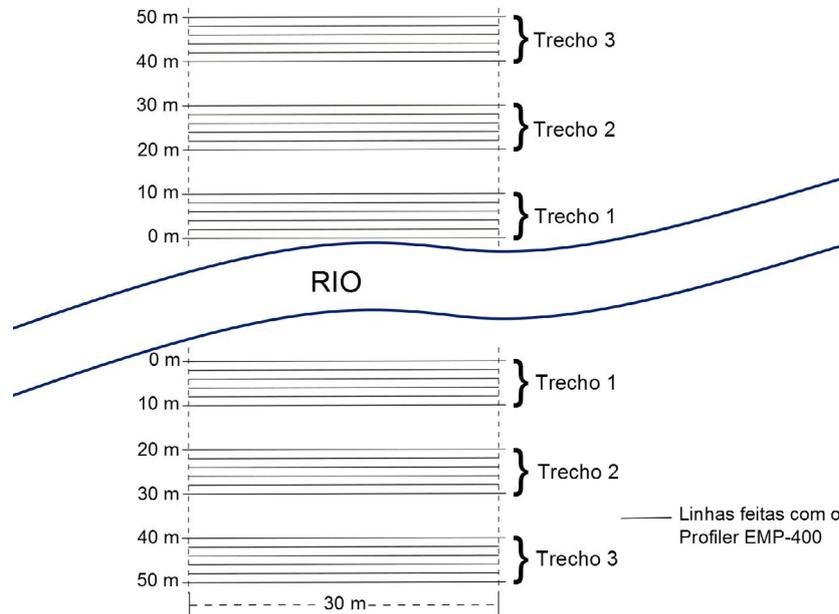


Figura 2.5: Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o método eletromagnético indutivo nas margens do rio.

Na aquisição de dados com o Profiler EMP-400 foram utilizados os arranjos de bobinas HDM *inline*, HDM *broadside*, VDM *inline* e VDM *broadside*. Apenas em um trecho escolhido na margem do rio foi feito levantamentos com todas as quatro configurações de bobinas, com o objetivo de comparar os resultados e escolher o arranjo que obteve os melhores resultados de imageamento dos dutos. Depois de escolher o arranjo que obteve o melhor resultado foi feito levantamentos nos outros trechos nas margens do rio apenas com este arranjo de bobinas escolhido. As frequências utilizadas no levantamento foram 1000, 7000 e 15000 Hz.

2.4 Processamento e visualização dos dados

O processamento dos dados de GPR foi feito utilizando o programa de computador Reflex-Win versão 5.0. A sequência de processamento utilizada foi o filtro dewow (*subtract-mean*), correção do tempo zero (*move starttime*), correção estática (*static correction*), ganho no tempo (*energy decay*), remoção do background (*background removal*), filtragem fk, conversão da escala de tempo para profundidade e corte no tempo (*time cut*).

O filtro dewow é utilizado para eliminar componentes de frequências muito baixas que

estão associados com a saturação do sinal gravado devido à alta energia das ondas aérea e terrestre, que são as primeiras a chegar.

A correção de tempo zero é feita por causa de efeitos relacionados com a eletrônica do sistema e pelo fato de considerar nula a separação entre antenas (seção zero *off-set*), mesmo havendo uma pequena separação entre elas. Esta correção é feita deslocando o zero da seção de radar para a primeira quebra de amplitude no traço, que corresponde à chegada da onda direta que viaja pelo ar. Esta correção também ajusta a profundidade dos refletores.

A correção estática corrige o desalinhamento em tempo dos traços, que pode ser provocado por saltos da antena devido a irregularidades do terreno ou pedregulhos na superfície. A correção estática consiste em deslocar os traços no tempo para corrigir o desalinhamento dos traços adjacentes.

Por causa da atenuação do sinal com a profundidade é necessário a aplicação de ganho no tempo para aumentar as amplitudes do sinal correspondentes aos refletores mais profundos. O objetivo do ganho é obter uma melhor visualização das feições da seção de radar e compensar a perda de energia do sinal com a profundidade. Foi usado o ganho decaimento de energia.

O filtro de remoção do *background* é útil para remover o ruído de fundo e ajuda na remoção da reverberação da antena (*ringing*) nos dados, mas sem remover os refletores reais mesmo que aproximadamente horizontais. A onda direta que se propaga pelo ar tem amplitude muito mais alta do que o sinal refletido em subsuperfície e esta saturação de amplitude pode mascarar algumas reflexões muito rasas. A remoção do *background* atenua a onda direta, ajudando na visualização das reflexões mais rasas.

A filtragem fk atua no domínio da frequência (f) e no domínio do número de onda (k) e é útil para suprimir eventos com uma inclinação particular.

A conversão da escala de tempo para profundidade foi feita realizando um ajuste das hipérbolas dos pontos difratores para obter a velocidade aproximada do meio e com essa velocidade foi feita a conversão da escala para profundidade.

Foi aplicado um corte no tempo para excluir a parte final da seção, que não apresenta informações.

Para o método eletromagnético foi utilizado o programa de computador MagMap 2000 versão 4.92 para editar e visualizar os dados obtidos com o equipamento Profiler EMP-400. Este programa fornece a visualização dos dados em forma de mapa.

CAPÍTULO 3

Resultados obtidos

Neste capítulo será mostrado os resultados obtidos com os métodos de GPR e eletromagnético indutivo raso com o objetivo de detectar dutos metálicos.

Foi feita uma comparação entre antenas de GPR com frequências de 100, 200 e 400 MHz na aplicação de detectar dutos e foi feito também uma análise da eficiência do GPR à medida que se afasta do rio, considerando que é de se esperar uma diminuição da saturação do solo nas camadas mais superficiais.

O método eletromagnético indutivo foi utilizado com o objetivo de mapear os dutos e fazer uma comparação com o método de GPR.

Serão mostrados agora os resultados obtidos nas duas margens do rio Quiricó Grande e do Rio Sauípe.

3.1 Rio Quiricó Grande

Foram feitos cinco perfis de GPR em cada margem do rio Quiricó Grande, como mostra a figura 3.1, com as antenas de 100, 200 e 400 MHz e foram feitos três trechos de levantamento eletromagnético em cada margem do rio, como mostra a figura 3.2.

Na margem esquerda do Rio Quiricó Grande não foi possível realizar todos os perfis de GPR na sua extensão de 30 metros por causa da existência de um barranco. Por isso os perfis 2, 3, 4 e 5 de GPR foram feitos com tamanho de linha menor que 30 metros. As linhas feitas com o Profiler EMP-400 também foram encurtadas nos trechos 2 e 3 pelo mesmo motivo.

3.1.1 Margem direita do rio Quiricó Grande

A figura 3.3 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na posição de 50 metros afastado da margem do rio (perfil 5 indicado no croqui). No perfil de 100 MHz é possível visualizar três hipérboles bem definidas, indicando que existem três dutos nas posições aproximadas 8, 12 e 15 metros. Nos perfis de 200 e 400 MHz é possível visualizar quatro hipérboles difratoras, indicando que existem quatro dutos nas posições aproximadas

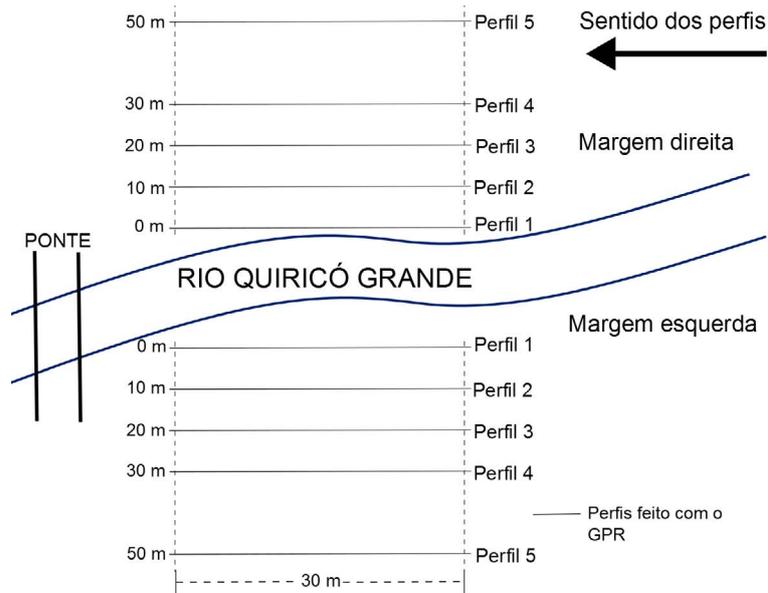


Figura 3.1: Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o GPR nas margens do rio Quiricó Grande.

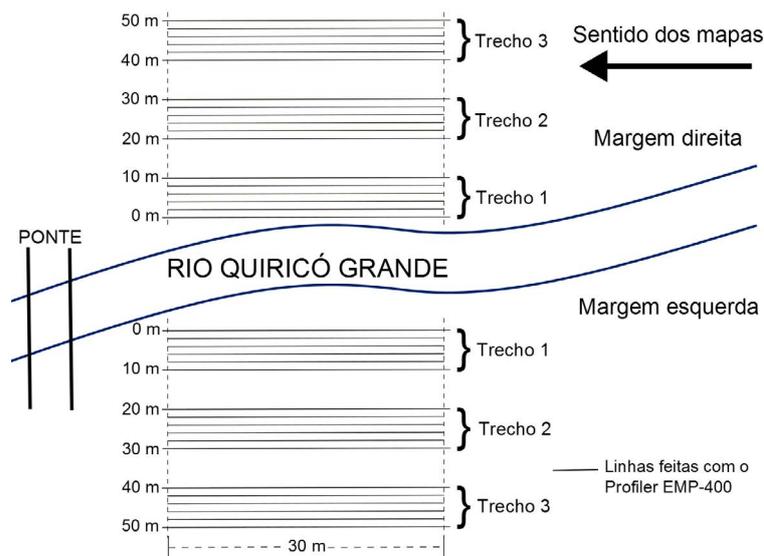


Figura 3.2: Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o método eletromagnético indutivo nas margens do rio Quiricó Grande.

de 4, 8, 12 e 15 metros.

A profundidade dos dutos encontrada nos perfis com frequências diferentes podem ser um pouco diferentes para o mesmo duto, isto acontece por causa de problemas como a definição do tempo zero ou na escolha das hipérbolas para realização do ajuste de hipérbole, que tem por objetivo definir a velocidade do pulso de GPR. Portanto foram adotados valores

para ilustrar a profundidade dos dutos detectados, que neste caso foi de 2.2 metros para o primeiro duto, 1.7 metros para o segundo duto, 1.3 metros para o terceiro duto e 2.3 metros para o quarto duto.

A figura 3.4 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na posição de 30 metros afastado da margem do rio (perfil 4 indicado no croqui). Nestes perfis é possível visualizar quatro hipérbolas de difração, indicando que existem quatro dutos nas posições aproximadas de 5, 9, 13 e 18 metros. Na seção de 400 MHz existe mais uma hipérbole na posição de aproximadamente 15 metros, mas comparando com os perfis com frequências de 100 e 200 MHz e com a posição dos dutos mostrada pelo equipamento eletromagnético indutivo (Profiler EMP-400) chega-se à conclusão que essa hipérbole não corresponde a um duto, mas provavelmente esta hipérbole de difração é causada por um matacão enterrado.

Os valores adotados para ilustrar a profundidade dos dutos detectados com o GPR nesta linha foi de 1.8 metros para o primeiro duto, 1.7 metros para o segundo duto, 1.0 metro para o terceiro duto e 2.0 metros para o quarto duto.

A figura 3.5 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na posição de 20 metros afastado da margem do rio (perfil 3 indicado no croqui). Nos perfis de 100 MHz e 200 MHz é possível visualizar quatro hipérbolas de difração, indicando que existem quatro dutos nas posições aproximadas de 4, 9, 12 e 18 metros. Na seção de 400 MHz aparecem apenas três hipérbolas localizadas nas posições de 9, 12 e 18 metros. Na seção de 100 MHz existe mais uma hipérbole na posição de aproximadamente 22 metros, mas comparando com os perfis com frequências de 100 e 200 MHz e com a posição dos dutos mostrada pelo equipamento eletromagnético indutivo (Profiler EMP-400) chega-se à conclusão que essa hipérbole não corresponde a um duto, mas pode ser causada pela existência de um matacão enterrado.

Os valores adotados para ilustrar a profundidade dos dutos detectados com o GPR nesta linha foi de 2.0 metros para o primeiro duto, 1.6 metros para o segundo duto, 1.0 metro para o terceiro duto e 1.7 metros para o quarto duto.

A figura 3.6 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na posição de 10 metros afastado da margem do rio (perfil 2 indicado no croqui). No perfil de 100 MHz é possível visualizar quatro hipérbolas de difração, indicando que existem quatro dutos nas posições aproximadas de 4, 9, 13 e 19 metros. Na seção de 200 e 400 MHz aparecem apenas três hipérbolas localizadas nas posições de 9, 13 e 19 metros.

Os valores adotados para ilustrar a profundidade dos dutos detectados com o GPR nesta linha foi de 2.4 metros para o primeiro duto, 1.6 metros para o segundo duto, 1.2 metros para o terceiro duto e 2.2 metros para o quarto duto.

A figura 3.7 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na

posição de 0 metros afastado da margem do rio (perfil 1 indicado no croqui). No perfil de 100 MHz é possível visualizar apenas três hipérboles de difração, indicando que existem três dutos nas posições aproximadas de 9.5, 12.5 e 18 metros. Na seção de 200 e 400 MHz aparecem apenas duas hipérboles localizadas nas posições de 9.5 e 12.5 metros.

Os valores adotados para ilustrar a profundidade dos dutos detectados com o GPR nesta linha foi de 1.4 metros para o primeiro duto, 1.0 metro para o segundo duto e 3.8 metros para o terceiro duto detectado nesta linha.

Observando as figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 em conjunto, pode-se perceber que no perfil 5, que é o mais distante do rio, foi possível detectar 3 dutos na frequência de 100 MHz e todos os quatro dutos com as frequências 200 e 400 MHz. No perfil 4 foi possível detectar todos os quatro dutos em todas as frequências. No perfil 3 as antenas de 100 e 200 MHz conseguem detectar todos os quatro dutos, mas a antena de 400 MHz só consegue detectar 3 dutos. No perfil 2 apenas a antena de 100 MHz consegue detectar todos os dutos e as antenas de 200 e 400 MHz conseguem detectar 3 dutos. No perfil 1 a antena de 100 MHz consegue detectar apenas 3 dutos e as antenas de 200 e 400 MHz detectam somente 2 dutos.

Esta análise mostra que a capacidade de detectar dutos com o GPR diminui à medida que se aproxima do rio. Acredita-se que o principal fator causador da perda da capacidade de detecção dos dutos seja a combinação de argilominerais com a saturação em água no solo, a qual aumenta à medida que se aproxima do rio. Como o solo com argilominerais atenua cada vez mais o sinal de radar à medida que há um aumento da saturação em água do solo, então o GPR perde a capacidade de detectar dutos quando se aproxima do rio por causa da atenuação do sinal. É possível perceber também que as antenas de 100 e 200 MHz tiveram um desempenho melhor na detecção de dutos do que a antena de 400 MHz.

Com o método eletromagnético indutivo (sistema Profiler EMP-400) foi escolhido o trecho 3 (de 40 a 50 metros do rio) para realizar aquisições com os quatro arranjos de bobinas, que são HDM *inline*, VDM *inline*, HDM *broadside* e VDM *broadside*.

Pelas figuras 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 observa-se que com todos os quatro arranjos é possível detectar os dutos, mas o arranjo que apresentou maior definição e portanto o melhor resultado para mapear os dutos neste trecho da margem foi o VDM *broadside* (figura 3.11). Por isso nos outros trechos desta margem e na margem esquerda do rio Quiricó Grande foram feitos levantamentos apenas com o arranjo VDM *broadside*.

De acordo com as figuras 3.11, 3.12 e 3.13 é possível detectar todos os quatro dutos em todos os três trechos que foram feitos a aquisição. Os dutos são representados por uma intensidade de valor mais alto em mapa (vermelho e amarelo). Uma melhor visualização dos dutos foi obtida com os dados em fase para todas as três frequências e em todos os três trechos.

No trecho 1 (figura 3.13) os dutos são detectados aproximadamente nas posições 3, 8, 11 e 18 metros do eixo horizontal. No trecho 2 (figura 3.12) os dutos são mapeados aproximadamente nas posições 4, 10, 13 e 19 metros do eixo horizontal. No trecho 3 (figura 3.11) os dutos são mapeados aproximadamente nas posições 3, 8, 12 e 16 metros do eixo horizontal.

Observa-se na figura 3.13 que o duto localizado na posição de 18 metros na horizontal possui uma intensidade mais alta na parte superior do mapa (entre 10 e 6 metros no eixo vertical) e esta intensidade decresce à medida que o duto se aproxima do rio. Isto ocorre pois os dutos são geralmente enterrados em profundidades mais altas quando chegam perto do rio. De acordo com a figura 3.6, pode-se verificar que no perfil 2 (10 metros da margem) a seção de GPR com a antena de 100 MHz mostra que este duto está localizado em aproximadamente 19 metros e atinge a profundidade de 2.0 metros. De acordo com a figura 3.7, observa-se que no perfil 1 (0 metros da margem) a seção de GPR com a antena de 100 MHz mostra que este mesmo duto foi localizado em 18 metros e atinge a profundidade de 3.8 metros. Estes dados de GPR mostram que este duto está mergulhando forte entre 10 e 0 metros de distancia do rio, passando de uma profundidade de 2.0 metros para 3.8 metros de profundidade.

Nas figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 foram colocados um mapa escolhido com um bom resultado do método eletromagnético indutivo, com o objetivo de comparar os resultados com o método de GPR. Percebe-se que a localização dos dutos pelos dois métodos coincide muito bem e que os dois métodos foram capazes de detectar todos os quatro dutos existentes nesta margem. O método de GPR quando se aproxima do rio vai perdendo a capacidade de detectar todos os dutos, mas o método eletromagnético indutivo continuou sendo capaz de mapear todos os quatro dutos.

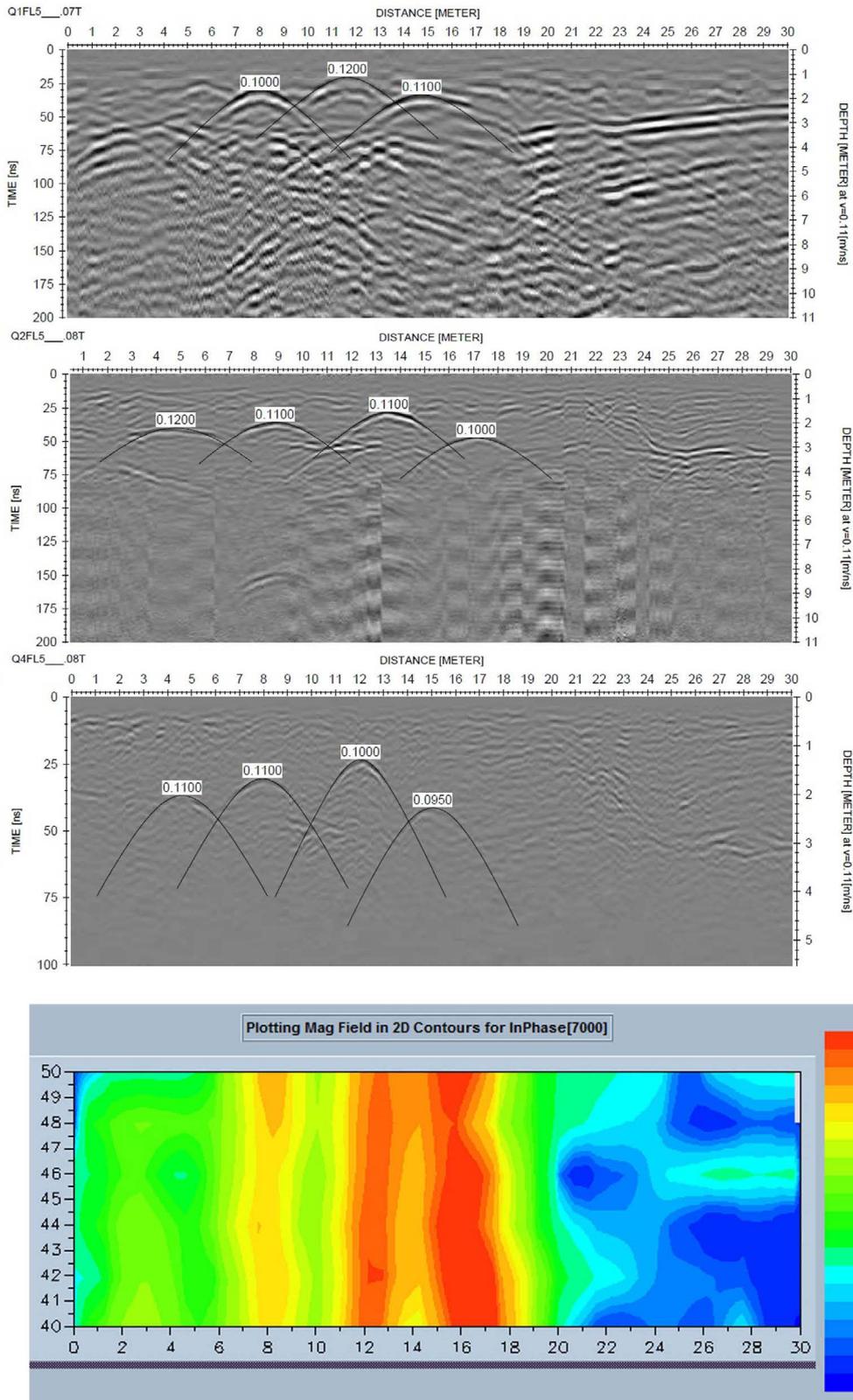


Figura 3.3: Perfil 5 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.

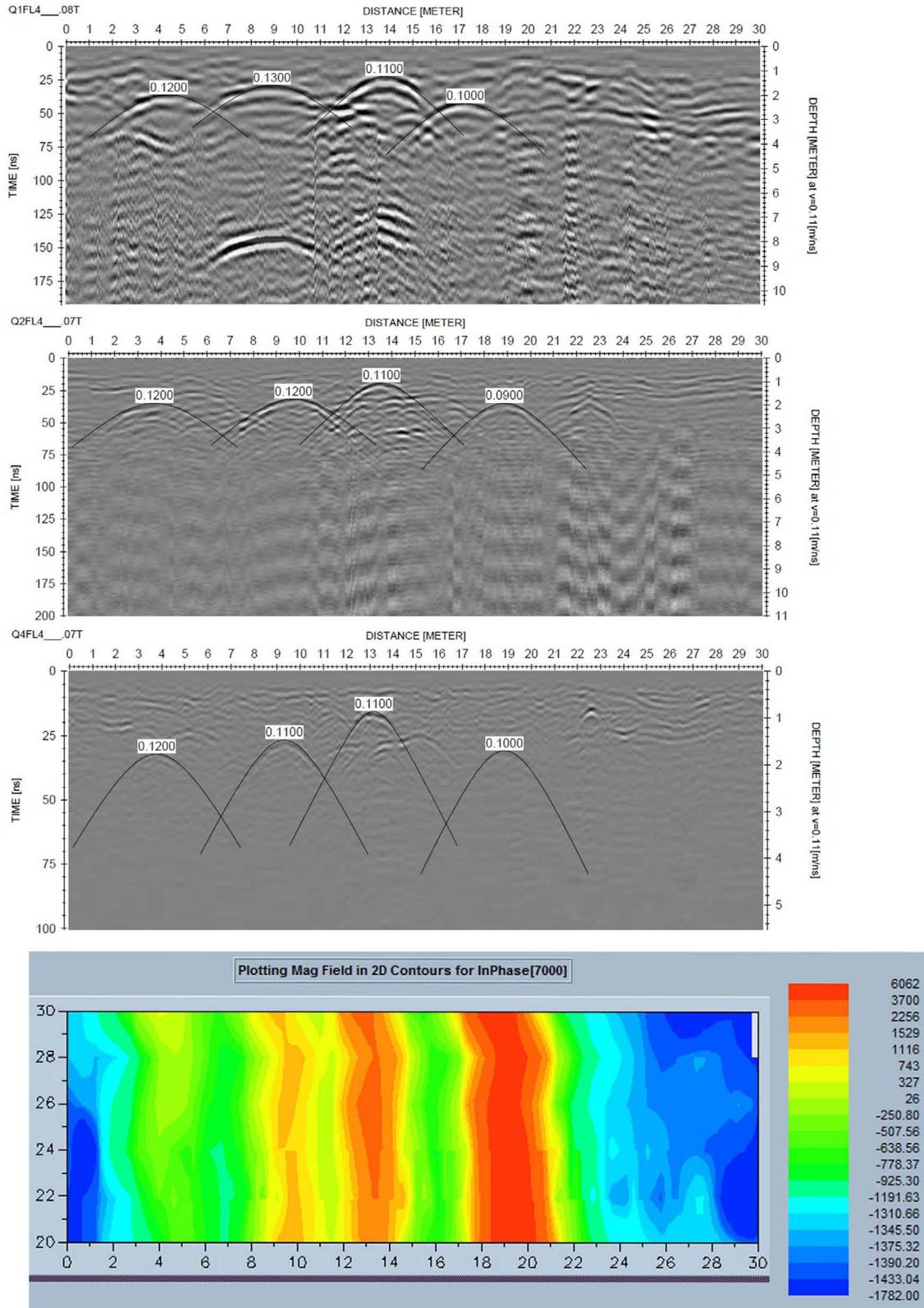


Figura 3.4: Perfil 4 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.

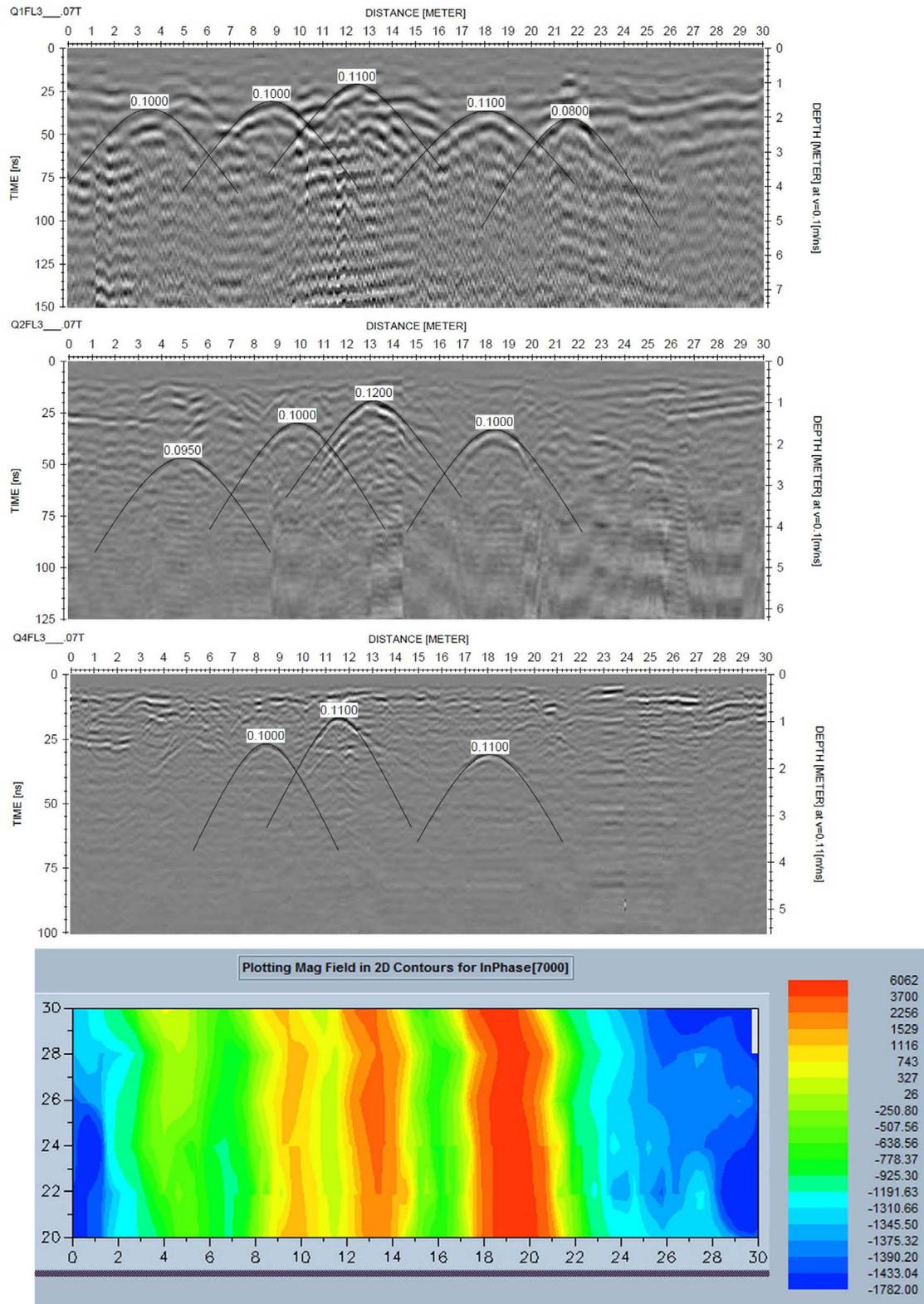


Figura 3.5: Perfil 3 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.

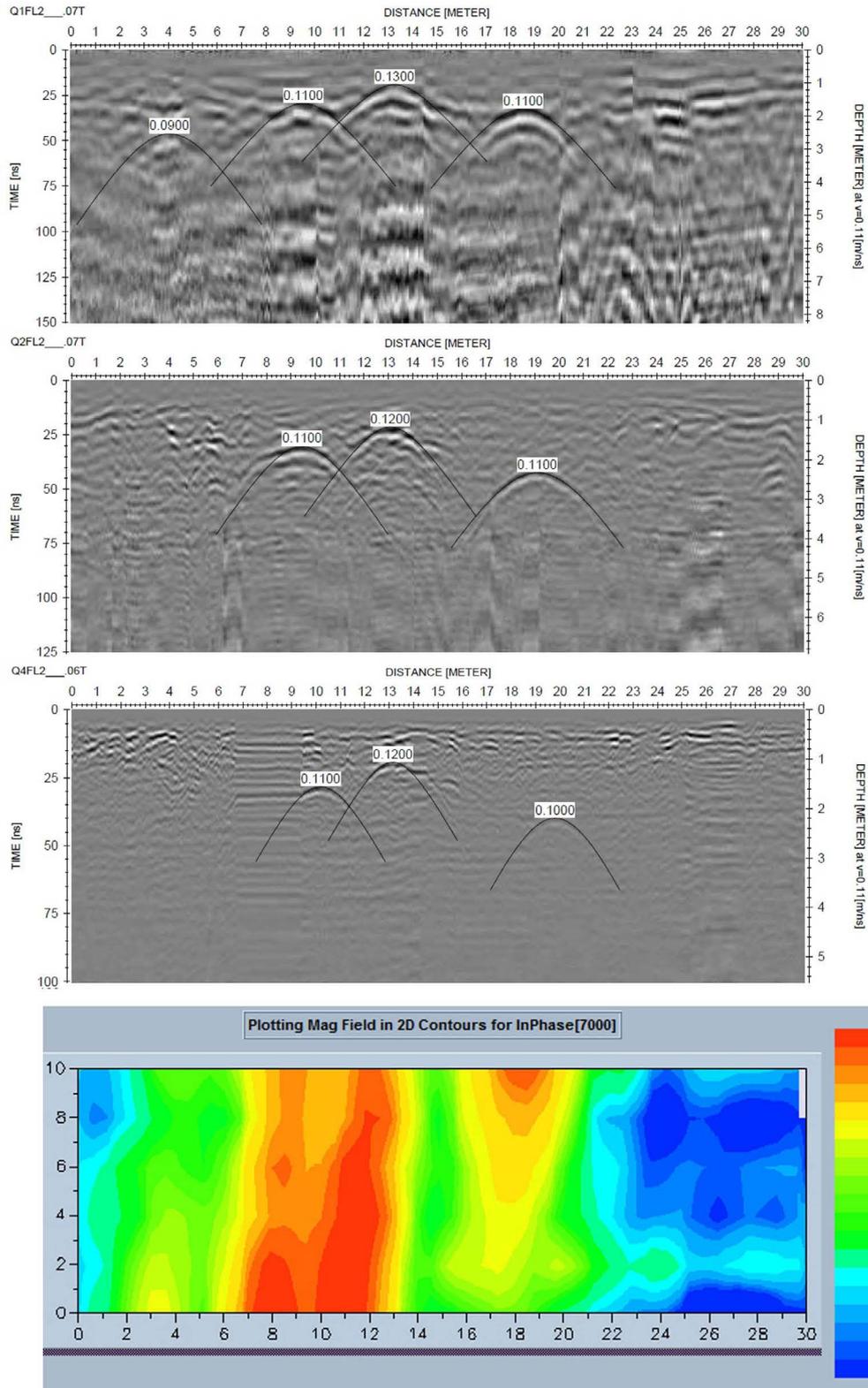


Figura 3.6: Perfil 2 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.

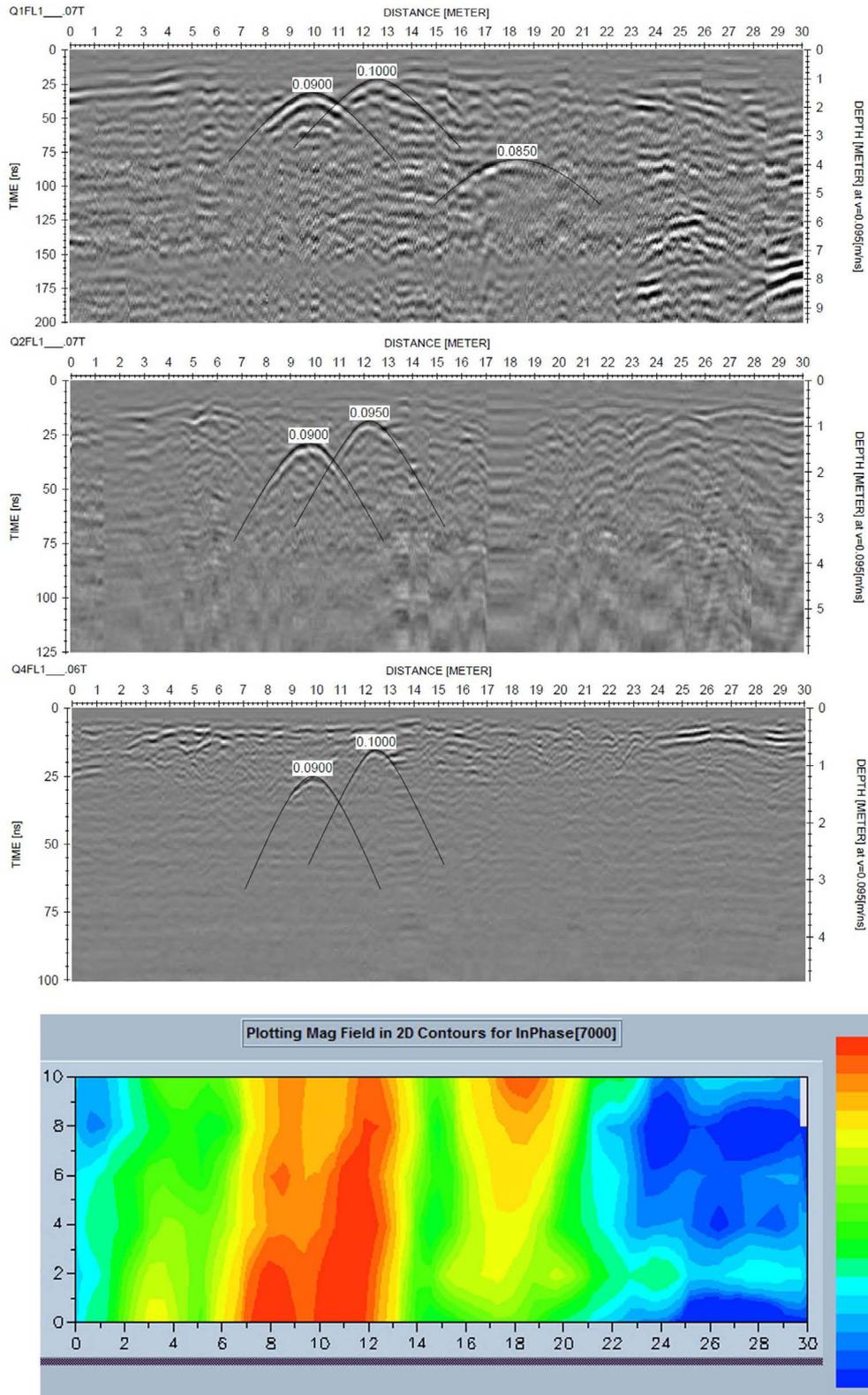


Figura 3.7: Perfil 1 de GPR da margem direita do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.

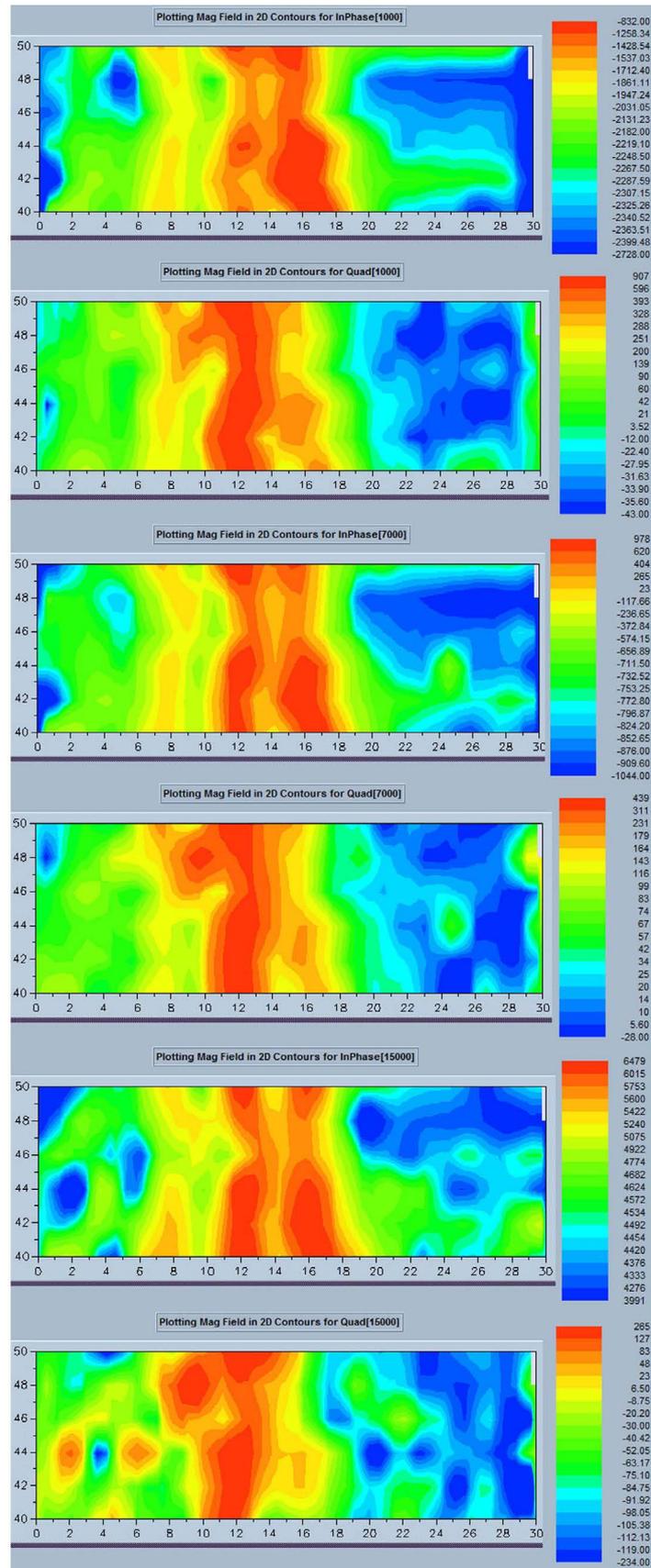


Figura 3.8: Trecho 3 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas HDM *inline*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

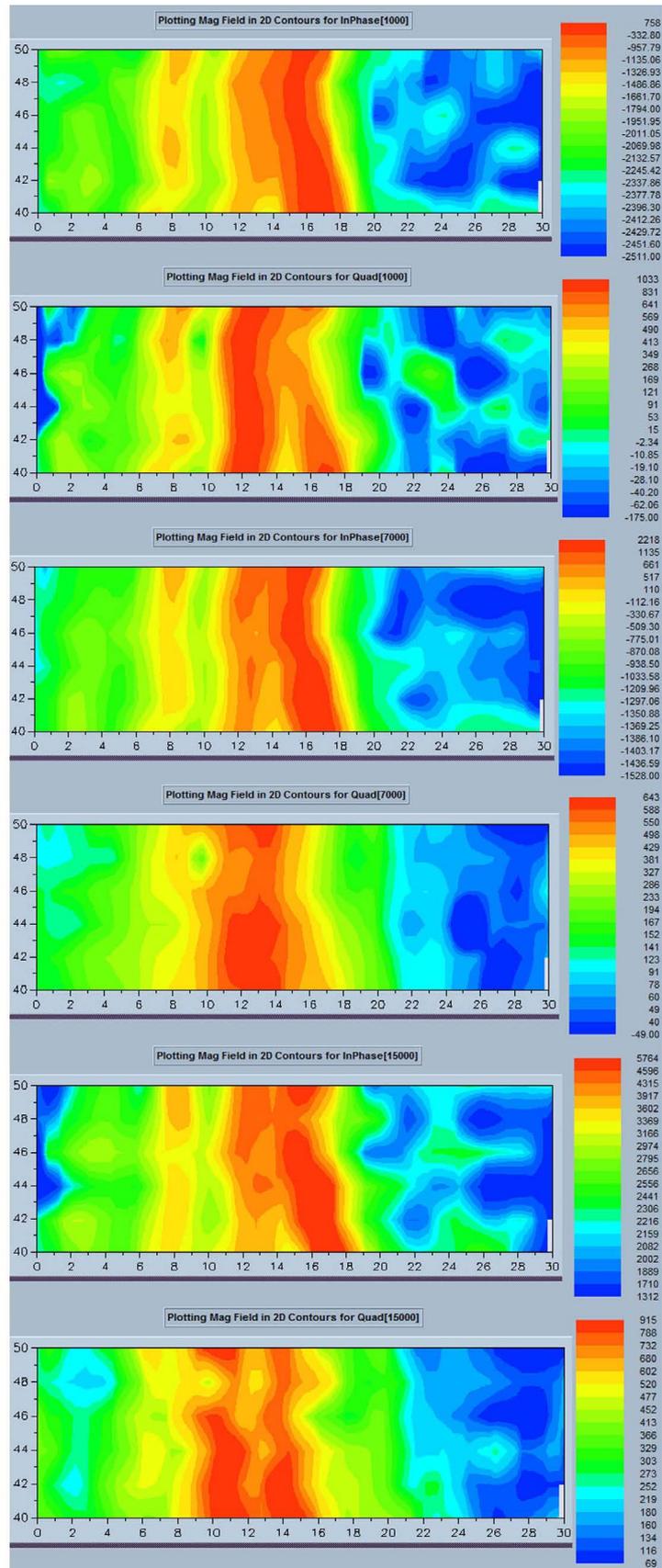


Figura 3.9: Trecho 3 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *inline*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

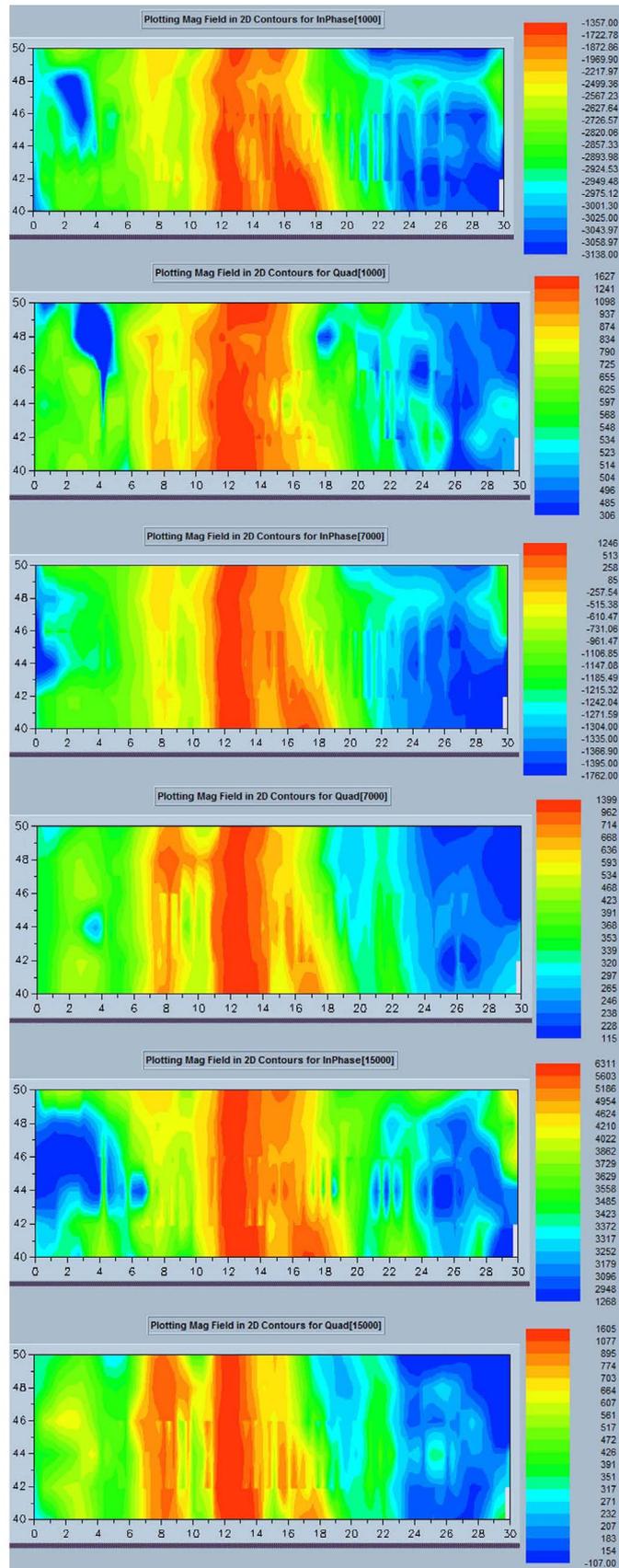


Figura 3.10: Trecho 3 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas HDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

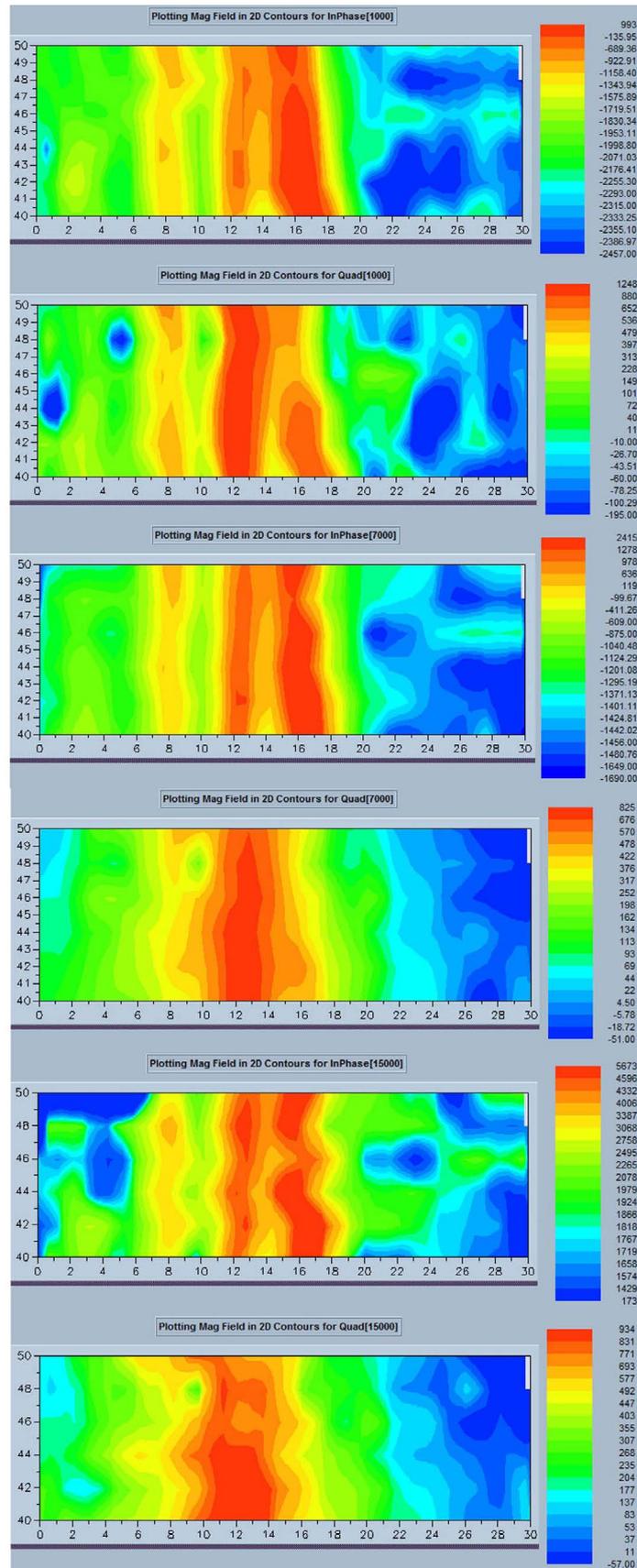


Figura 3.11: Trecho 3 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

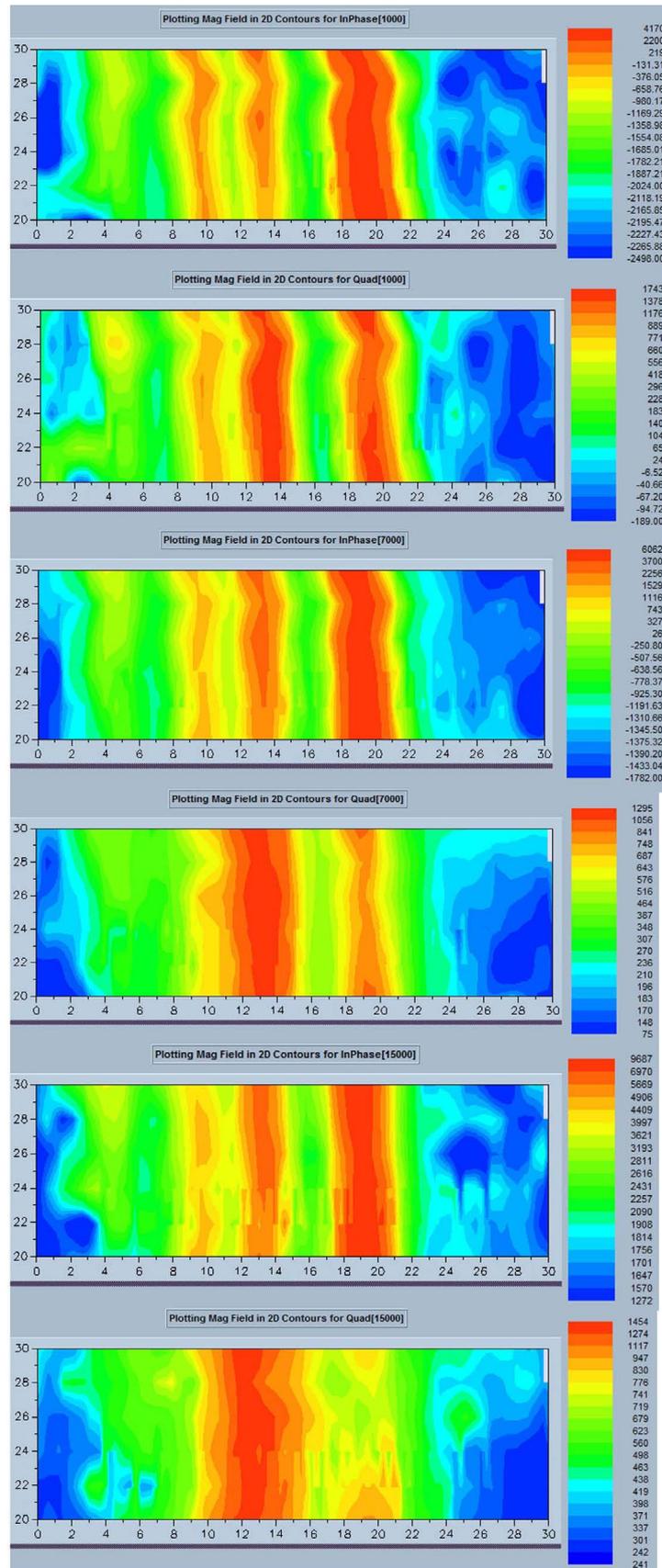


Figura 3.12: Trecho 2 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

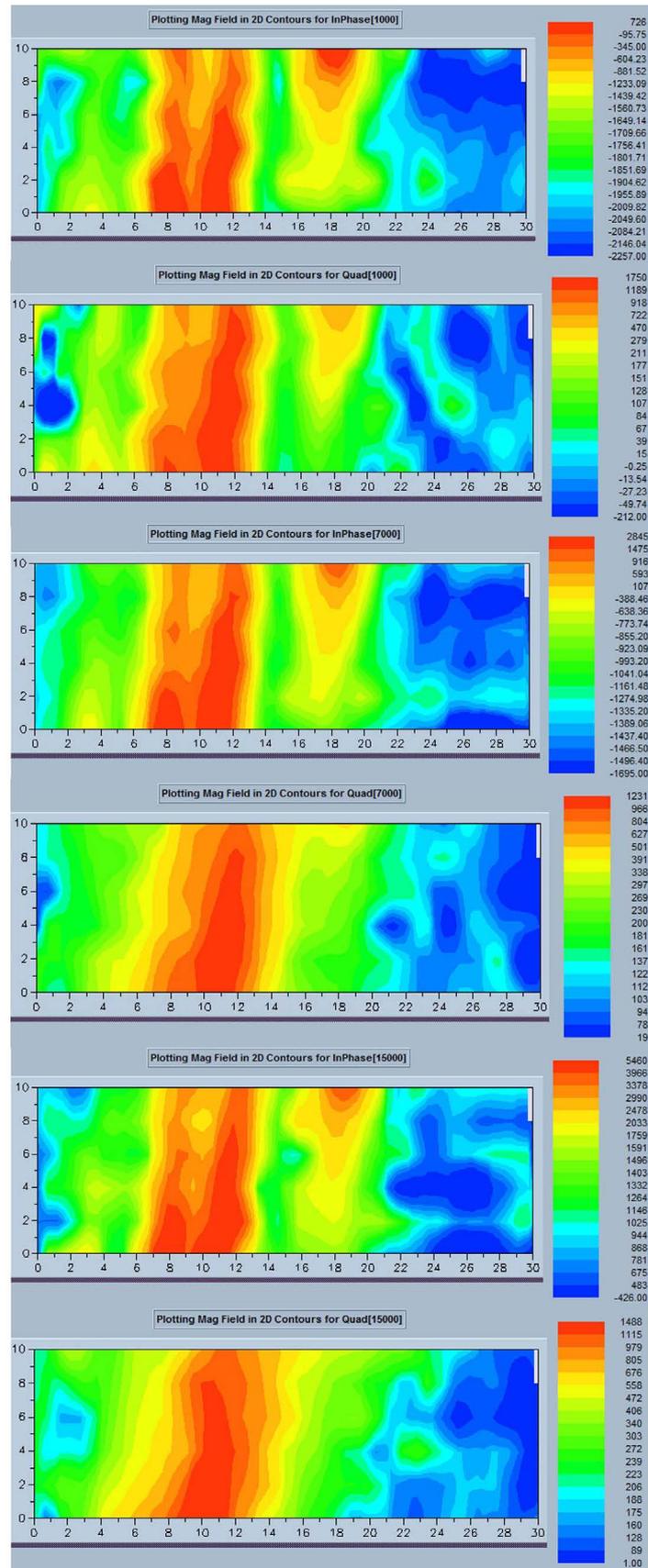


Figura 3.13: Trecho 1 da margem direita do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

3.1.2 Margem esquerda do rio Quiricó Grande

A figura 3.14 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na posição de 50 metros afastado da margem do rio (perfil 5 indicado no croqui). Nas seções de 100 e 200 MHz é possível visualizar quatro hipérboles de difração, indicando que existem quatro dutos nas posições aproximadas de 5, 9, 12 e 15.5 metros. Na seção de 400 MHz foi possível detectar apenas três hipérboles, localizadas nas posições de 5, 9 e 15.5 metros.

A profundidade dos dutos encontrada nos perfis com frequências diferentes podem ser um pouco diferentes para o mesmo duto, isto acontece por causa de problemas como a definição do tempo zero ou na escolha das hipérboles para realização do ajuste de hipérbole, que tem por objetivo definir a velocidade do pulso de GPR. Portanto foram adotados valores para ilustrar a profundidade dos dutos detectados, que neste caso foi de 1.2 metros para o primeiro duto, 1.6 metros para o segundo duto, 1.9 metros para o terceiro duto e 2.4 metros para o quarto duto.

A figura 3.15 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na posição de 30 metros afastado da margem do rio (perfil 4 indicado no croqui). Nos perfis de 100 MHz e 200 MHz é possível visualizar quatro hipérboles de difração, indicando que existem quatro dutos nas posições aproximadas de 5, 9.5, 12 e 17 metros. Na seção de 400 MHz aparecem apenas três hipérboles localizadas nas posições de 5, 9.5 e 12 metros.

Os valores adotados para ilustrar a profundidade dos dutos detectados com o GPR nesta linha foi de 1.0 metro para o primeiro duto, 1.6 metros para o segundo duto, 1.7 metros para o terceiro duto e 2.3 metros para o quarto duto.

A figura 3.16 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na posição de 20 metros afastado da margem do rio (perfil 3 indicado no croqui). Nestes perfis é possível visualizar quatro hipérboles de difração, indicando que existem quatro dutos nas posições aproximadas de 5, 9, 12 e 18 metros.

Os valores adotados para ilustrar a profundidade dos dutos detectados com o GPR nesta linha foi de 1.0 metro para o primeiro duto, 1.5 metros para o segundo duto, 1.7 metro para o terceiro duto e 2.5 metros para o quarto duto.

A figura 3.17 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na posição de 10 metros afastado da margem do rio (perfil 2 indicado no croqui). Em todos estes três perfis é possível visualizar seis hipérboles de difração, mas neste local só existem quatro dutos. Então duas dessas hipérboles provavelmente foram geradas devido a matacões enterrados. As hipérboles foram encontradas nas posições aproximadas de 5, 7.5, 9.5, 12, 17 e 20 metros. Analisando o alinhamento dos dutos pelos perfis 3, 4 e 5 (figuras 3.16, 3.15 e 3.14) pode-se concluir que a segunda e a última hipérbole, que estão localizadas em 7.5 e 20 metros respectivamente, não são dutos e podem ser matacões enterrados. Desta forma os

duto foram localizados neste perfil nas posições de 5, 9.5, 12 e 17 metros.

Os valores adotados para ilustrar a profundidade dos dutos detectados com o GPR nesta linha foi de 1.0 metro para o primeiro duto, 1.6 metros para o segundo duto, 1.8 metros para o terceiro duto e 2.2 metros para o quarto duto.

A figura 3.18 mostra perfis de GPR feitos com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, na posição de 0 metros afastado da margem do rio (perfil 1 indicado no croqui). No perfil de 100 e 200 MHz é possível visualizar bem apenas uma hipérbole de difração, que indica a presença de um duto na posição aproximada de 19 metros e com profundidade de 2.2 metros. Na seção de 400 MHz aparecem duas hipérbolas nas posições de 11.5 e 15 metros e atingem a profundidade de 0.5 metros. Por causa da profundidade muito rasa (50 centímetros) destas duas hipérbolas, pode-se concluir que elas não foram geradas pela presença de dutos, já que este é o perfil mais próximo do rio e os dutos geralmente são enterrados em profundidades mais altas quando se aproximam do rio. Por este motivo é mais provável que essas hipérbolas sejam causadas por matacões enterrados.

Observando as figuras 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 e 3.18 em conjunto, pode-se perceber que nos perfis 3, 4 e 5, mais distantes do rio, foi possível detectar todos os quatro dutos em todas as frequências de antenas. No perfil 2 aparecem seis hipérbolas em todas as frequências, dificultando assim saber qual hipérbole foi gerada por duto e qual hipérbole foi gerada por matacões. No perfil 1 as antenas de 100 e 200 MHz detectou um duto apenas e no perfil da antena de 400 MHz aparecem duas hipérbolas que não são dutos.

Nesta margem apenas no perfil 1 o GPR perdeu a capacidade de detectar dutos. Acredita-se que o principal fator causador da perda de capacidade de detecção dos dutos seja a combinação de argilominerais com a saturação de água no solo, a qual aumenta à medida que se aproxima do rio, aumentando assim a atenuação do sinal do radar.

Nesta margem as antenas de 100 e 200 MHz tiveram um desempenho melhor na detecção de dutos do que a antena de 400 MHz.

Com o método eletromagnético indutivo (sistema Profiler EMP-400) foi feita a aquisição nos trechos 1, 2 e 3 apenas com o arranjo VDM *broadside* (figuras 3.19, 3.20 e 3.21)

No trecho 1 (figura 3.21) foram detectados apenas três dutos, que foram localizados aproximadamente nas posições 5, 11 e 19 metros do eixo horizontal. No trecho 2 (figura 3.20) também foram detectados apenas três dutos, que foram mapeados aproximadamente nas posições 5, 10 e 19 metros do eixo horizontal. No trecho 3 (figura 3.19) foram detectados quatro dutos, que foram localizados aproximadamente nas posições 5, 9, 12 e 16 metros do eixo horizontal.

Uma melhor visualização dos dutos foi obtida com os dados em fase para todas as três frequências em todos os três trechos.

No trecho 1 (figura 3.21) existe uma anomalia com intensidade muito alta que é mais acentuada e definida nos dados em fase de 15000 Hz e está localizada entre 24 e 28 metros no eixo horizontal e entre 7 e 10 metros no eixo vertical. Esta anomalia foi causada por uma carroça que estava parada nesta posição. A carroça gerou esta anomalia porque ela possui peças de metal, como o eixo.

Nas figuras 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 e 3.18 foram colocados um mapa escolhido com um bom resultado do método eletromagnético indutivo, com o objetivo de comparar os resultados com o método de GPR. Percebe-se que a localização dos dutos que foram encontrados pelos dois métodos coincide muito bem e que os dois métodos foram capazes de detectar que existem quatro dutos nesta margem. Essas imagens mostram também que o duto que não foi detectado pelo método eletromagnético indutivo nos trechos 1 e 2 foi detectado com o método GPR.

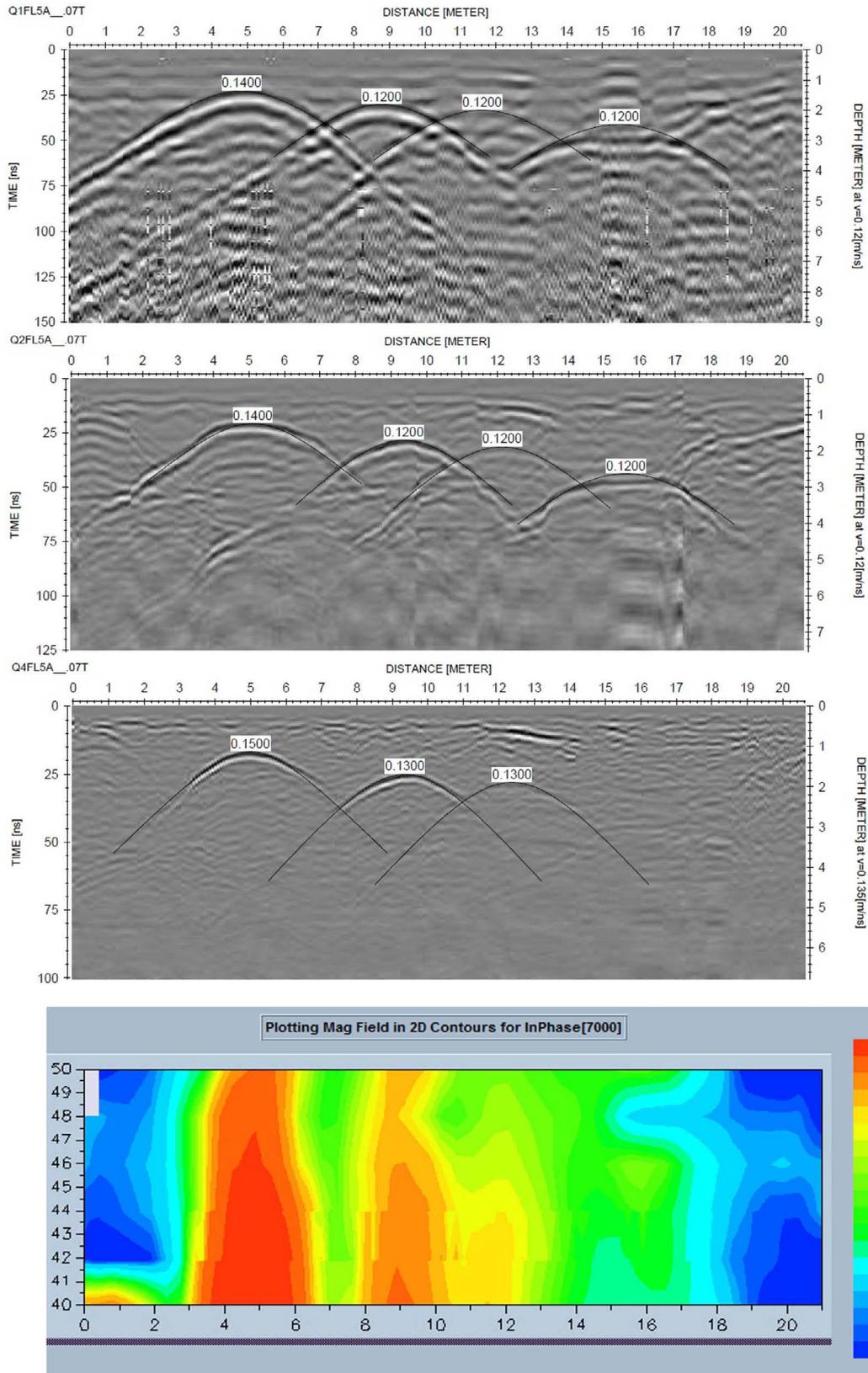


Figura 3.14: Perfil 5 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 7000 Hz.

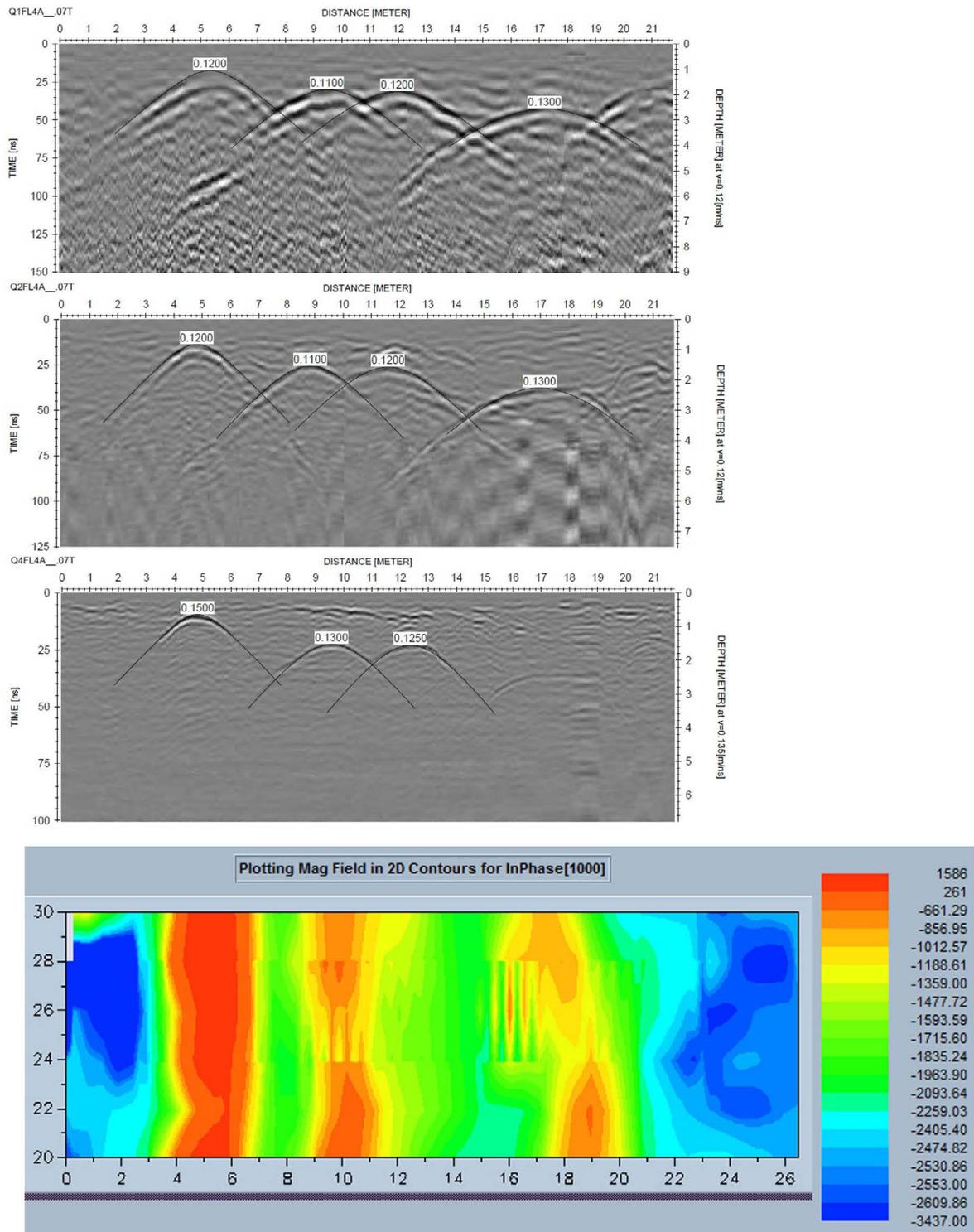


Figura 3.15: Perfil 4 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 1000 Hz.

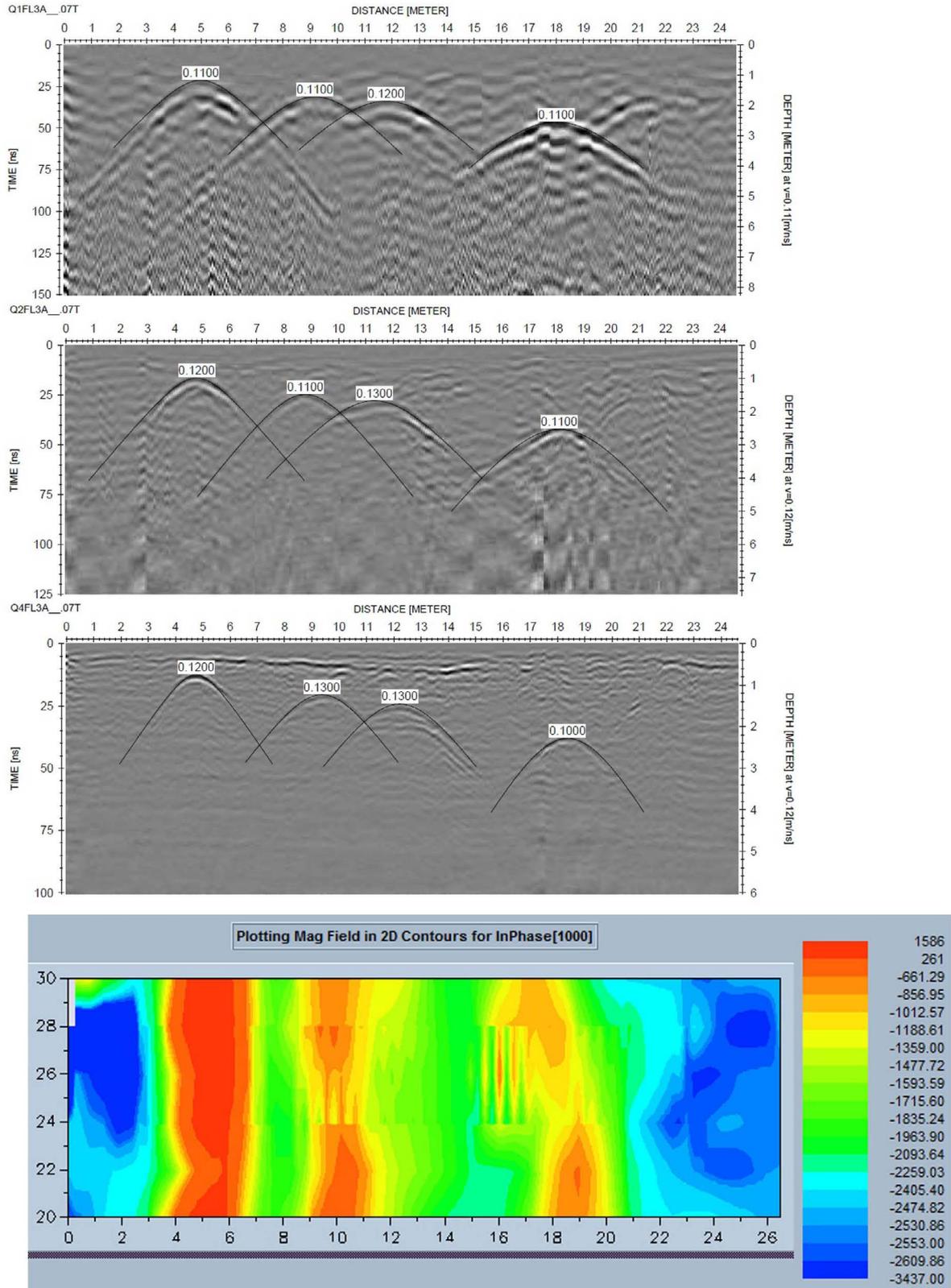


Figura 3.16: Perfil 3 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 1000 Hz.

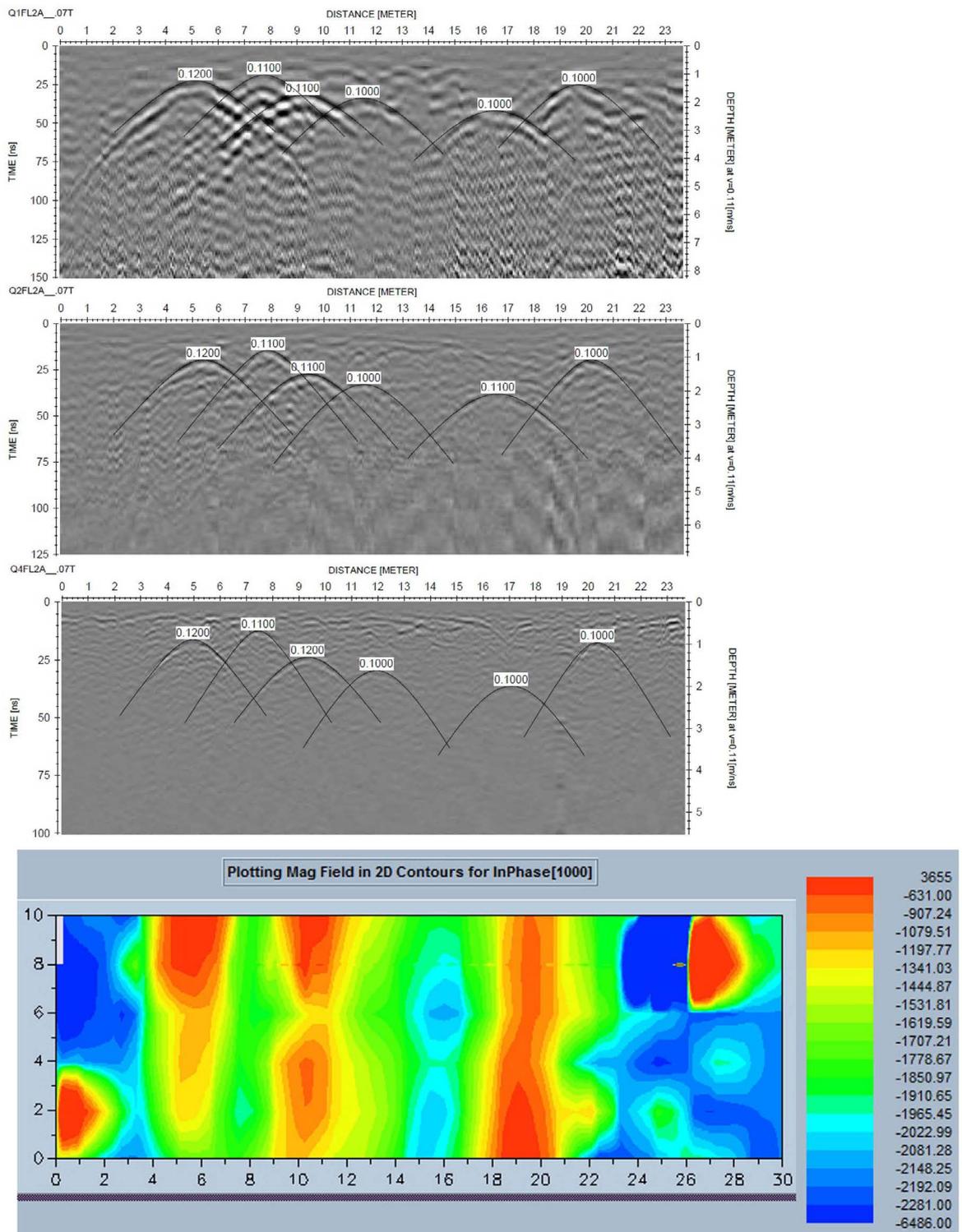


Figura 3.17: Perfil 2 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 1000 Hz.

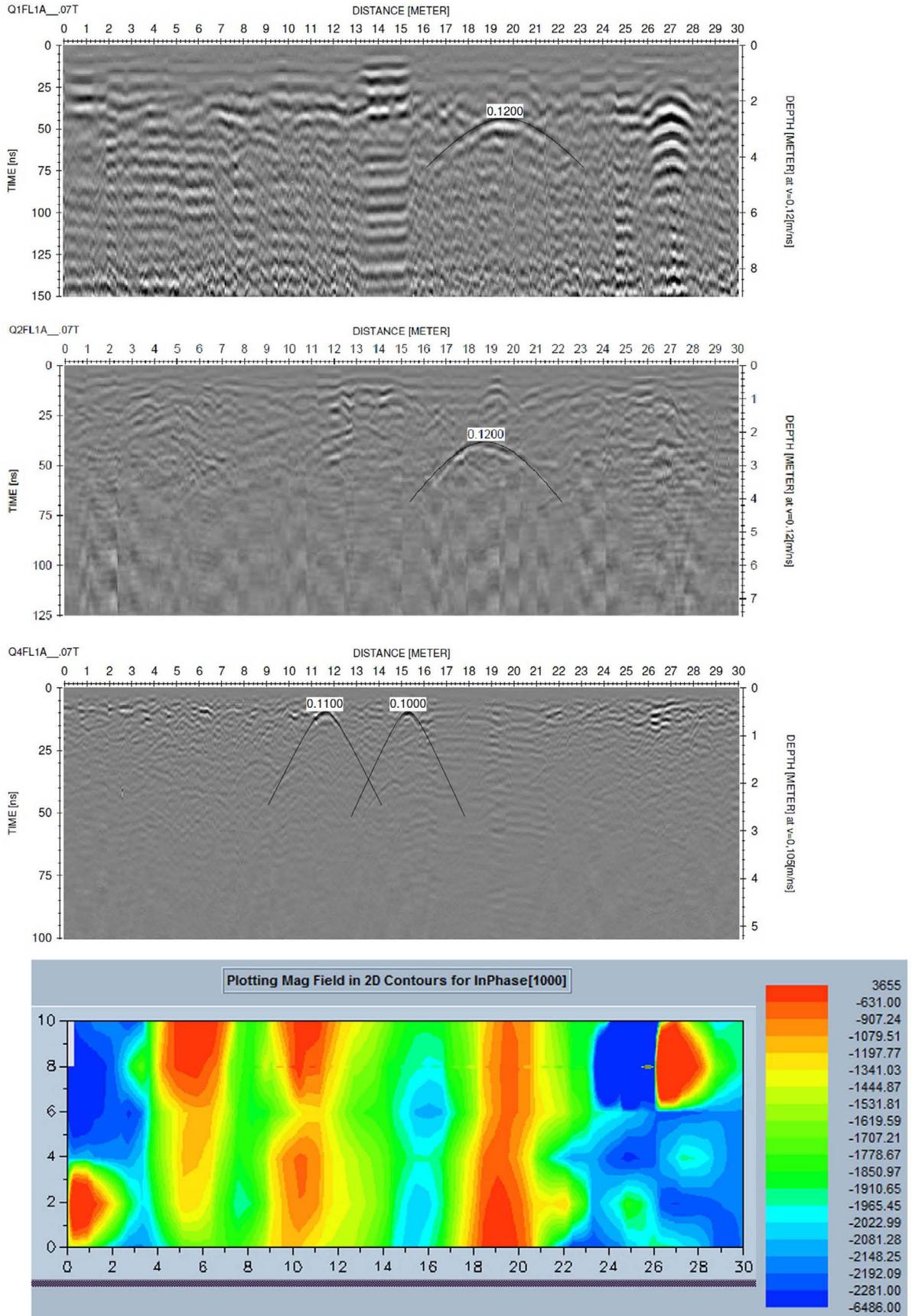


Figura 3.18: Perfil 1 de GPR da margem esquerda do Rio Quiricó Grande com as frequências de 100, 200 e 400 MHz, respectivamente, e o respectivo mapa de contorno do campo eletromagnético para a medida em fase de 1000 Hz.

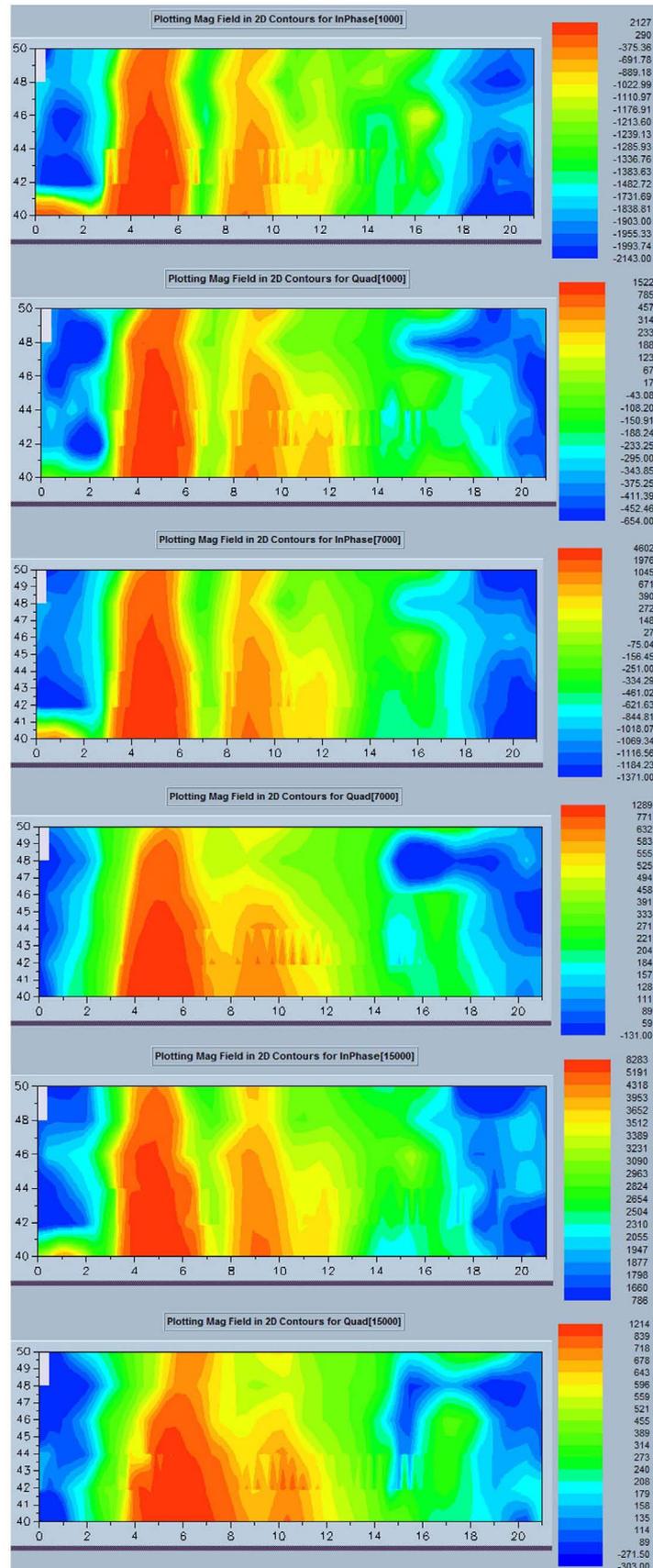


Figura 3.19: Trecho 3 da margem esquerda do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

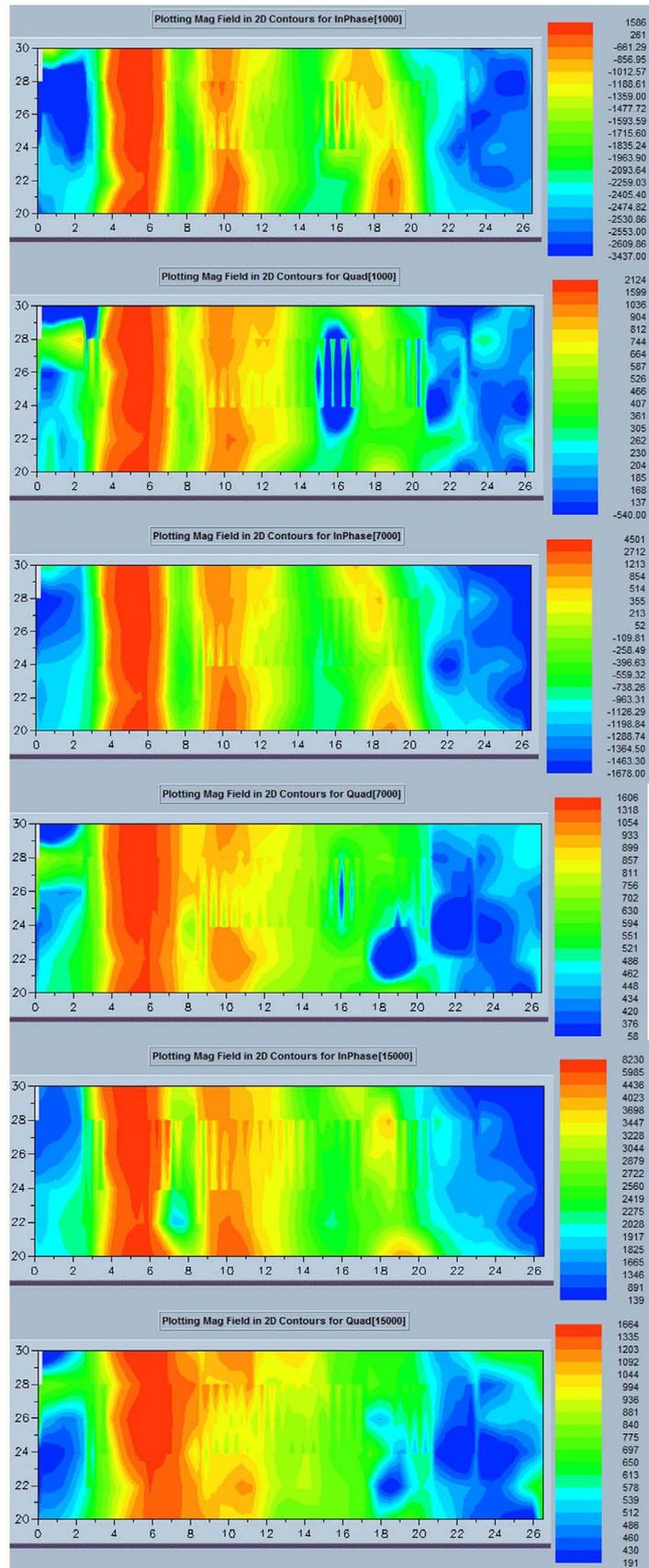


Figura 3.20: Trecho 2 da margem esquerda do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

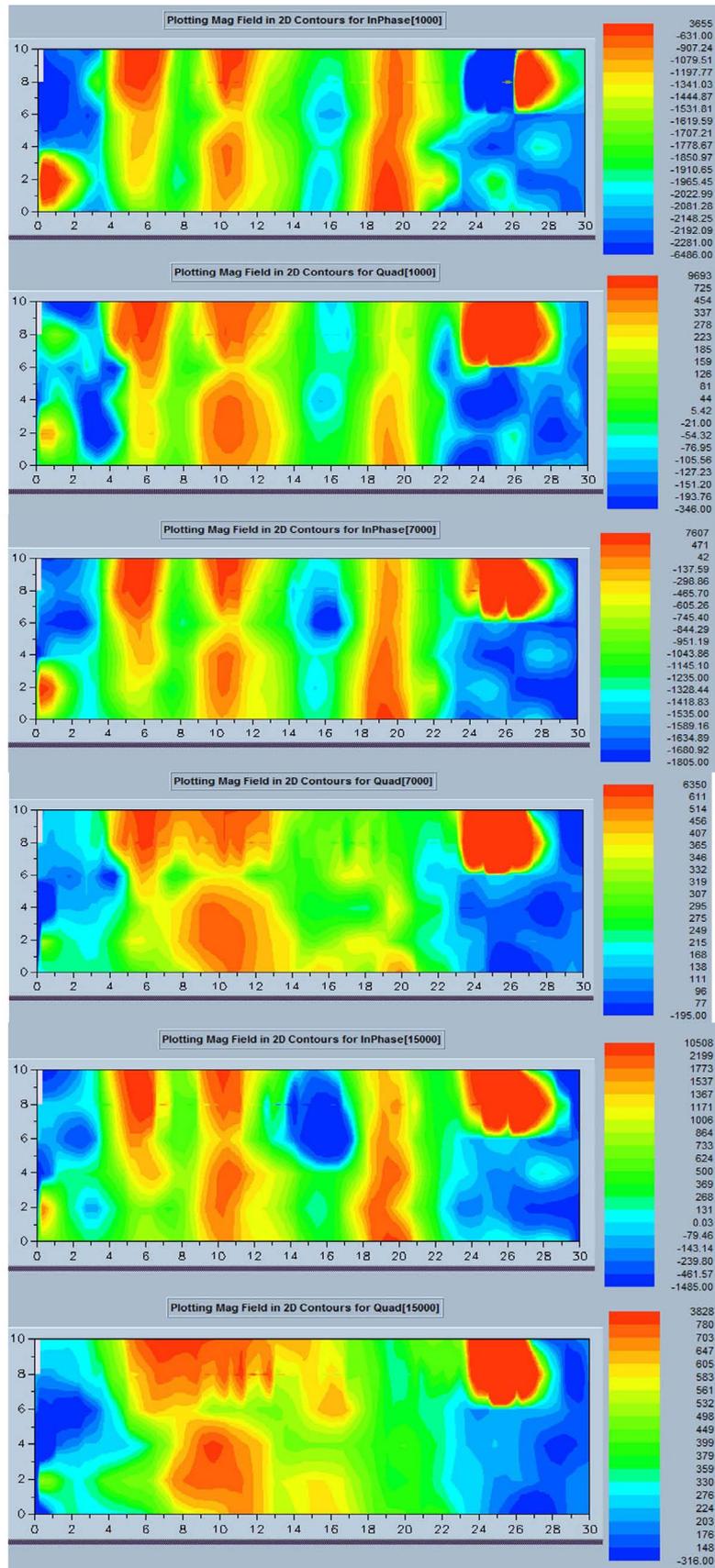


Figura 3.21: Trecho 1 da margem esquerda do Rio Quiricó Grande para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

3.2 Rio Sauípe

Foram feitos cinco perfis de GPR em cada margem do rio Sauípe, como mostra a figura 3.22, apenas com as antenas de 100 e 200 MHz. Foram feitos três trechos de levantamento eletromagnético na margem direita e um trecho apenas na margem esquerda, como mostra a figura 3.23.

Na margem esquerda do Rio Sauípe não foi possível realizar os perfis de GPR na sua extensão de 30 metros por causa da existência de uma região alagada. Por isso todos os cinco perfis de GPR foram feitos com tamanho de linha menor que 30 metros. As linhas feitas com o Profiler EMP-400 na margem esquerda também foram encurtadas pelo mesmo motivo.

Na margem esquerda do rio Sauípe não foi possível realizar aquisição de dados com o Profiler EMP-400 em outros trechos mais afastados do rio devido à existência de uma região alagada e devido a existência de vegetação, impossibilitando assim a aquisição com o método eletromagnético. Por isso só foi feita a aquisição em um trecho apenas nesta margem do rio.

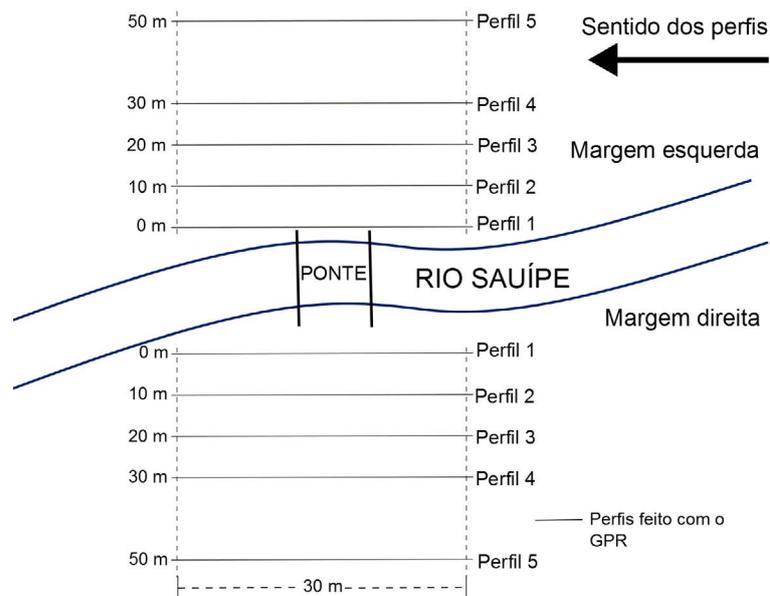


Figura 3.22: Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o GPR nas margens do rio Sauípe.

3.2.1 Margem direita do rio Sauípe

As figuras 3.25 e 3.26 mostram todos os 5 perfis de GPR feitos com as antenas de 100 e 200 MHz, respectivamente. Nestes perfis não foi possível identificar nenhuma hipérbole de difração que indique a presença de um duto, mas neste local existem quatro dutos.

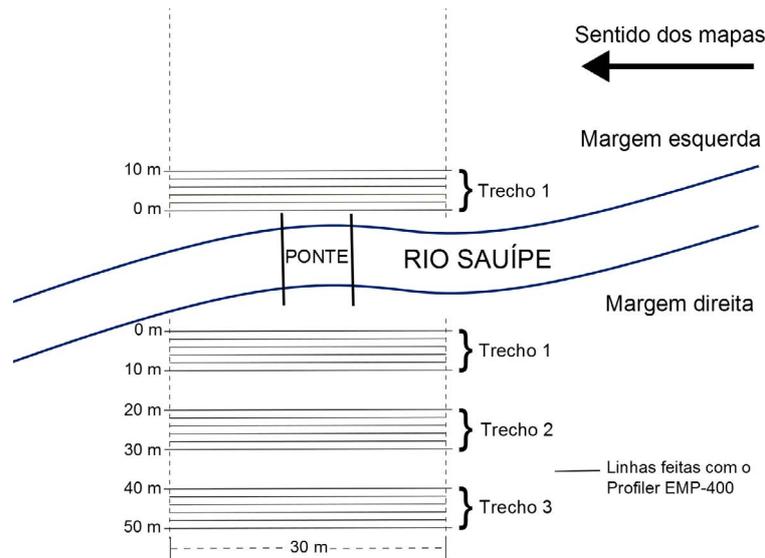


Figura 3.23: Croqui ilustrando o posicionamento das linhas de levantamento de dados com o método eletromagnético indutivo nas margens do rio Sauípe.

Nesta margem do rio Sauípe o radar não conseguiu detectar nenhum duto. O motivo mais provável disso é o fato do solo ter alta condutividade elétrica nesta região por causa do conteúdo de argila no solo ser alta, causando desta forma uma forte atenuação do sinal do radar e conseqüentemente impedindo a visualização do duto na seção de GPR.

Com o método eletromagnético indutivo (sistema Profiler EMP-400) foi escolhido o trecho 1 (de 0 a 10 metros do rio) para realizar aquisições com os quatro arranjos de bobinas, que são HDM *inline*, VDM *inline*, HDM *broadside* e VDM *broadside*.

Pelas figuras 3.27, 3.28, 3.29 e 3.30 observa-se que com os arranjos HDM *inline* e VDM *inline* o método não obteve um bom desempenho e existe uma dificuldade para mapear os dutos. Os arranjos HDM *broadside* e VDM *broadside* tiveram um bom desempenho e ambos mapearam três dutos, mas com o arranjo VDM *broadside* o método obteve o melhor desempenho e conseguiu mapear melhor os dutos. Por isso nos outros trechos desta margem e na margem esquerda do rio Sauípe foram feitos levantamentos apenas com o arranjo VDM *broadside*.

De acordo com as figuras 3.30, 3.31 e 3.32 é possível detectar três dutos no trecho 1, quatro dutos nos trechos 2 e no trecho 3 é possível distinguir três dutos.

No trecho 1 (figura 3.30) foram detectados três dutos aproximadamente nas posições 20, 23 e 27 metros do eixo horizontal. Os melhores resultados foram obtidos com os dados em fase de 7000 e 15000 Hz. Na posição de 10 a 12 metros no eixo horizontal e de 0 a 1 metro no eixo vertical existe uma anomalia de alta amplitude (vermelho) que é causada pela

existência de uma placa metálica nesta localização, que pode ser vista na figura 3.24



Figura 3.24: Foto da placa metálica que gera uma anomalia no trecho 1 com o método eletromagnético.

No trecho 2 (figura 3.31) são mapeados todos os quatro dutos, que são localizados aproximadamente nas posições 11, 19, 23 e 27 metros do eixo horizontal. O melhor resultado foi obtido com o dado em fase de 7000 Hz.

No trecho 3 (figura 3.32) os dados tiveram uma qualidade menor do que nos outros dois trechos feitos nesta margem. Apenas três dutos foram bem mapeados neste trecho e foram localizados nas posições de aproximadamente 12, 21 e 27 metros do eixo horizontal. O trecho 3 foi feito com o tamanho de linha menor por causa da existência de vegetação muito densa.

Na margem direita do rio Sauípe o GPR não teve nenhum resultado. Com o método eletromagnético foi possível visualizar que existem quatro dutos nesta margem, mesmo não conseguindo visualizar todos os dutos em todos os trechos.

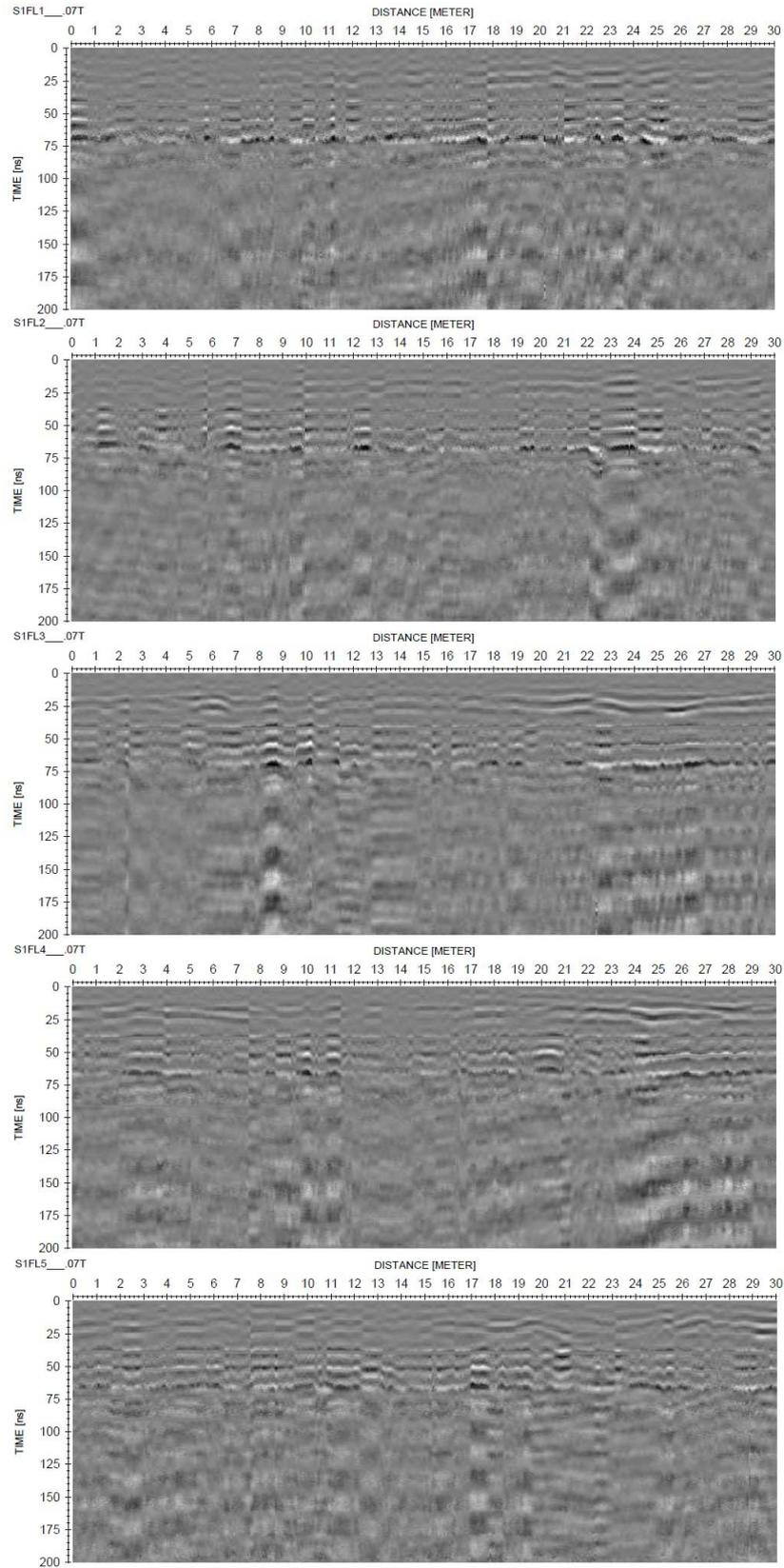


Figura 3.25: Perfis 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, feitos com a antena de GPR de 100 MHz na margem direita do Rio Sauípe.

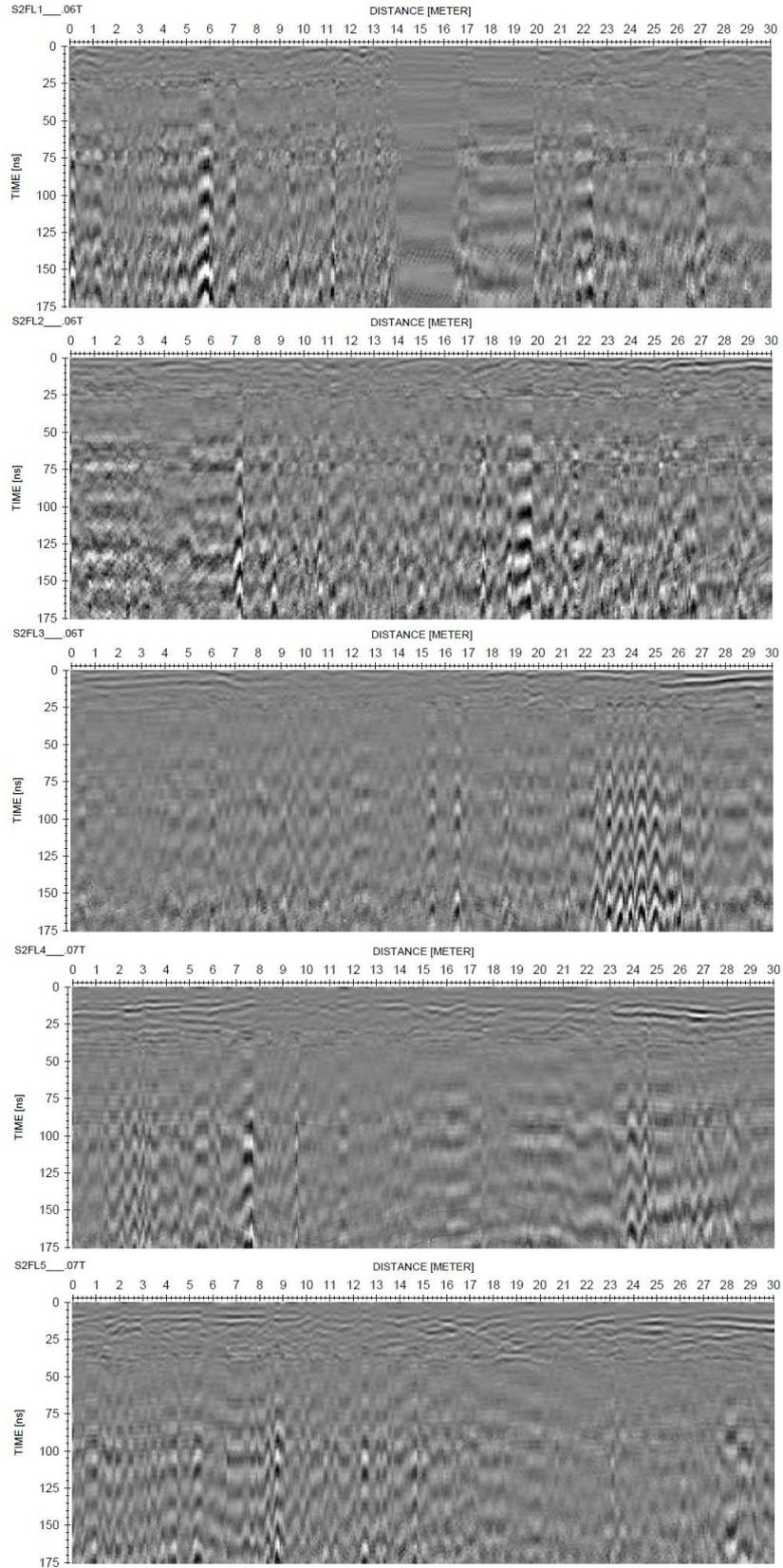


Figura 3.26: Perfis 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, feitos com a antena de GPR de 200 MHz na margem direita do Rio Sauípe.

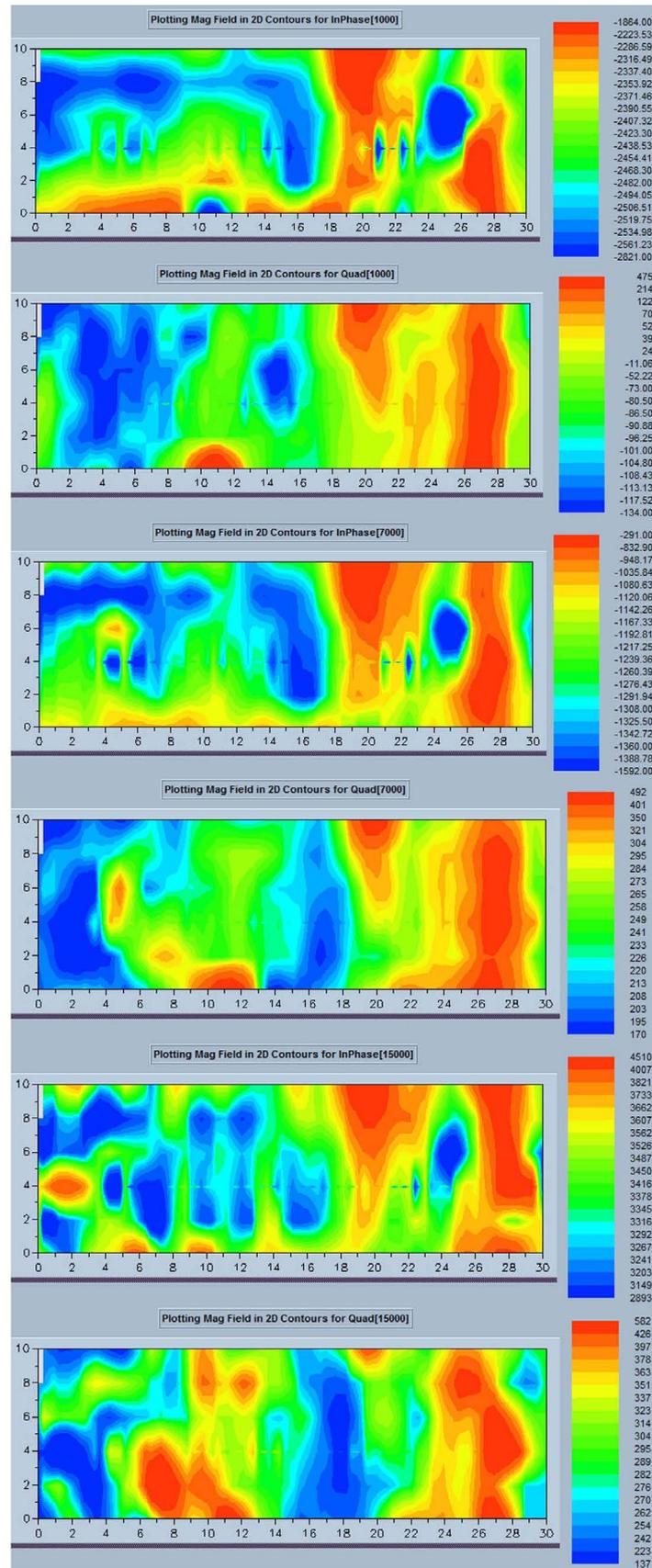


Figura 3.27: Trecho 1 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas HDM *inline*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

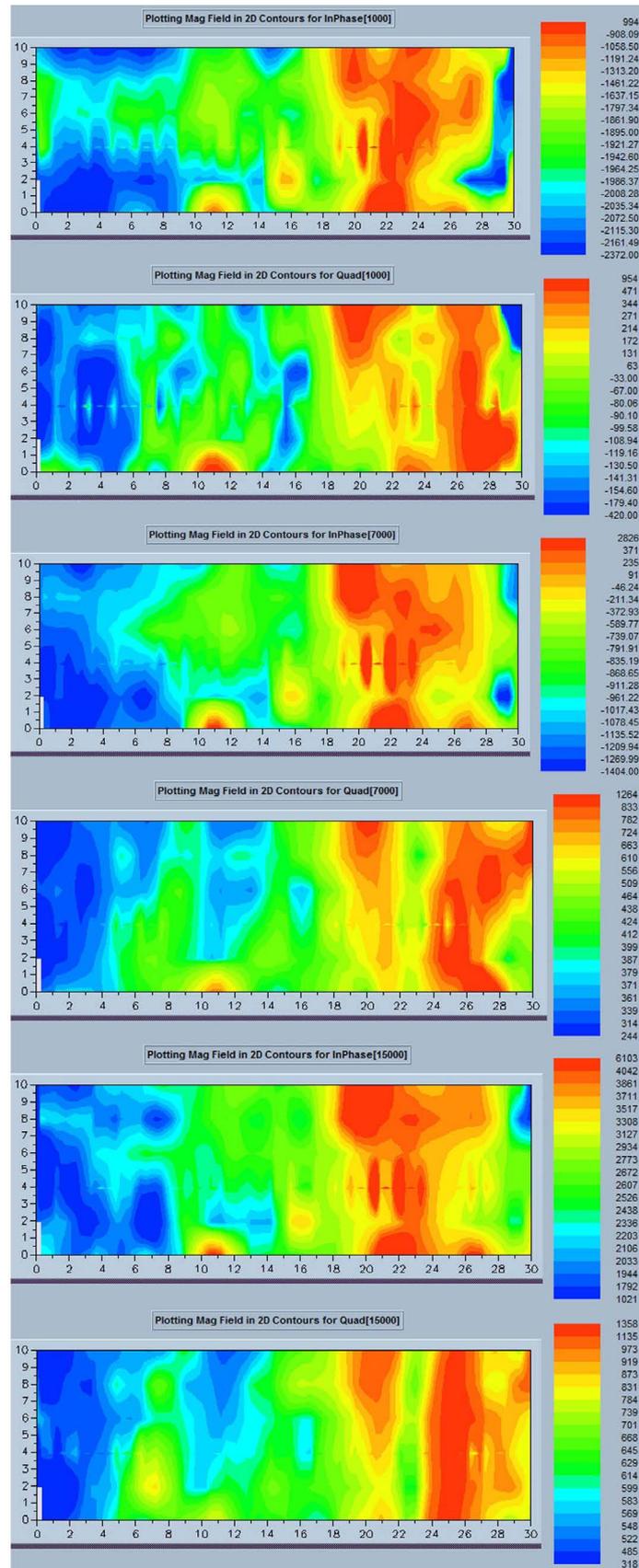


Figura 3.28: Trecho 1 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *inline*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

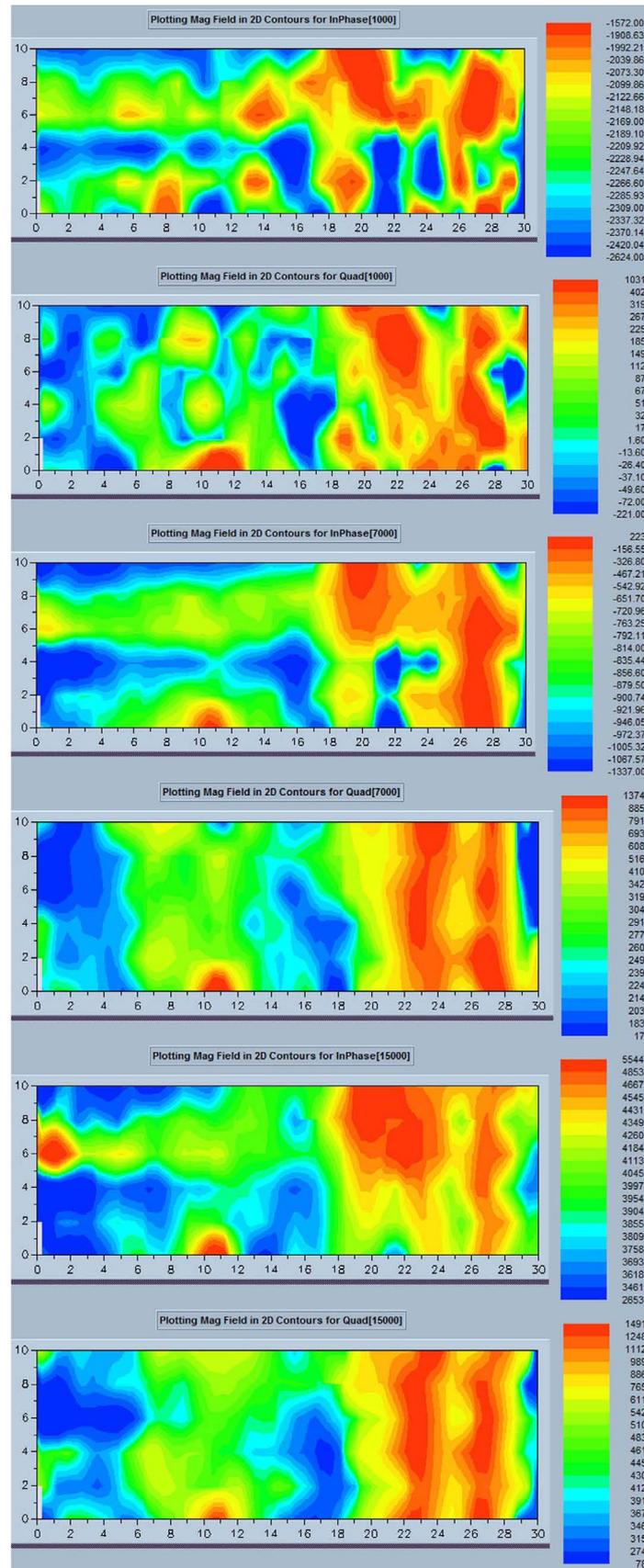


Figura 3.29: Trecho 1 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas HDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

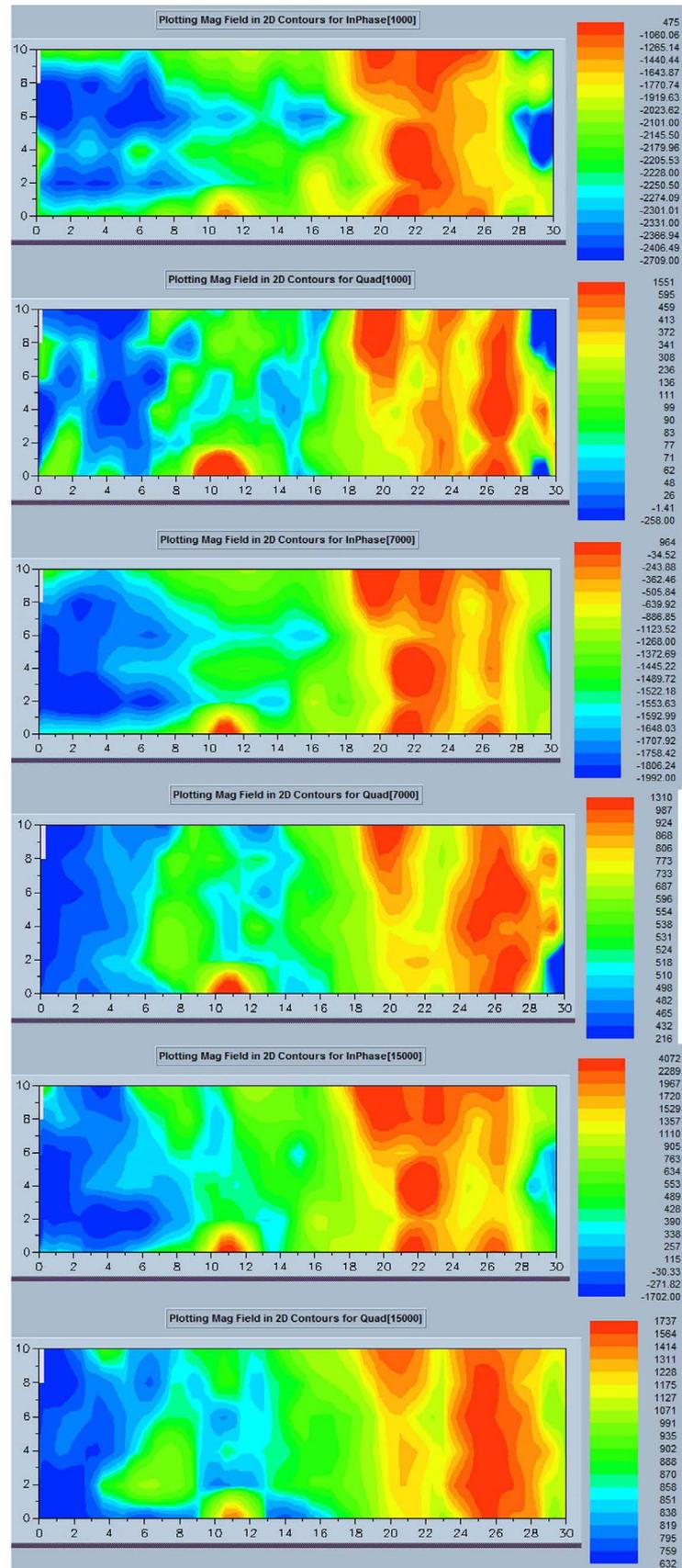


Figura 3.30: Trecho 1 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

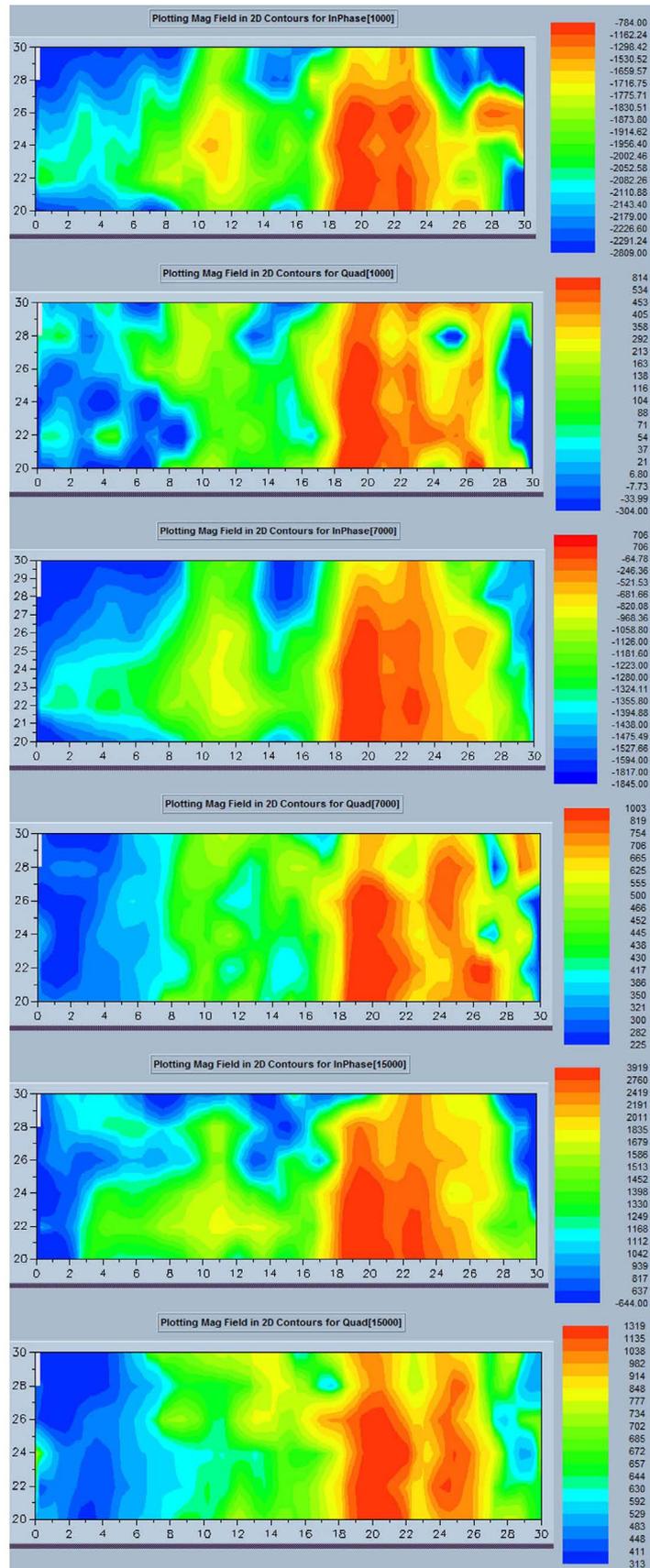


Figura 3.31: Trecho 2 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

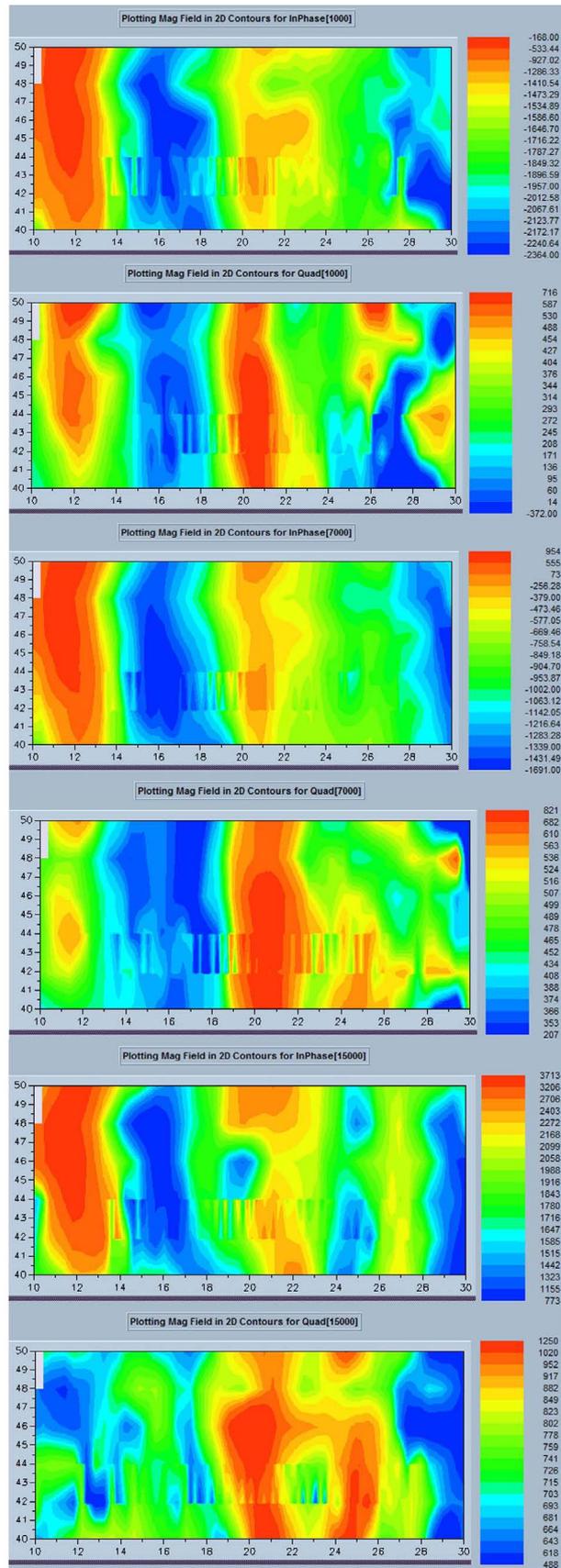


Figura 3.32: Trecho 3 da margem direita do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

3.2.2 Margem esquerda do rio Sauípe

A figura 3.33 mostra todos os 5 perfis de GPR feitos com a antena de 100 MHz. Nestes perfis não foi possível identificar nenhuma hipérbole de difração que indique a presença de um duto, mas neste local existem 4 dutos.

A figura 3.34 mostra todos os 5 perfis de GPR feitos com a antena de 200 MHz. Foi possível identificar apenas uma hipérbole que indica a presença de um duto nos perfis 1 e 2, que são mais próximos do rio. Este duto está localizado em aproximadamente 19.5 metros nos perfis 1 e 2 e atinge a profundidade de aproximadamente 0.7 metros.

O motivo mais provável da má qualidade das seções de GPR nesta margem é o fato do solo ter alta condutividade elétrica nesta região por causa do conteúdo de argila no solo ser alta, causando desta forma uma forte atenuação do sinal do radar.

Com o método eletromagnético indutivo (sistema Profiler EMP-400) foi feita a aquisição apenas no trecho 1 com o arranjo VDM *broadside* (figura 3.35). A linha neste trecho 1 foi feita menor do que 30 metros de comprimento por causa da existência de uma região alagada e vegetação no local.

No trecho 1 (figura 3.35) foram detectados apenas dois dutos, que foram localizados aproximadamente nas posições de 16 e 20 metros do eixo horizontal. Uma melhor visualização dos dutos foi obtida com os dados em fase para todas as três frequências.

A posição da hipérbole mostrada nos perfis 1 e 2 de GPR com a antena de 200 MHz coincide muito bem com o duto que foi encontrado na posição de 20 metros com o método eletromagnético.

Nesta margem os dois métodos não tiveram um bom resultado, o GPR só foi capaz de localizar um duto e o método eletromagnético dois dutos.

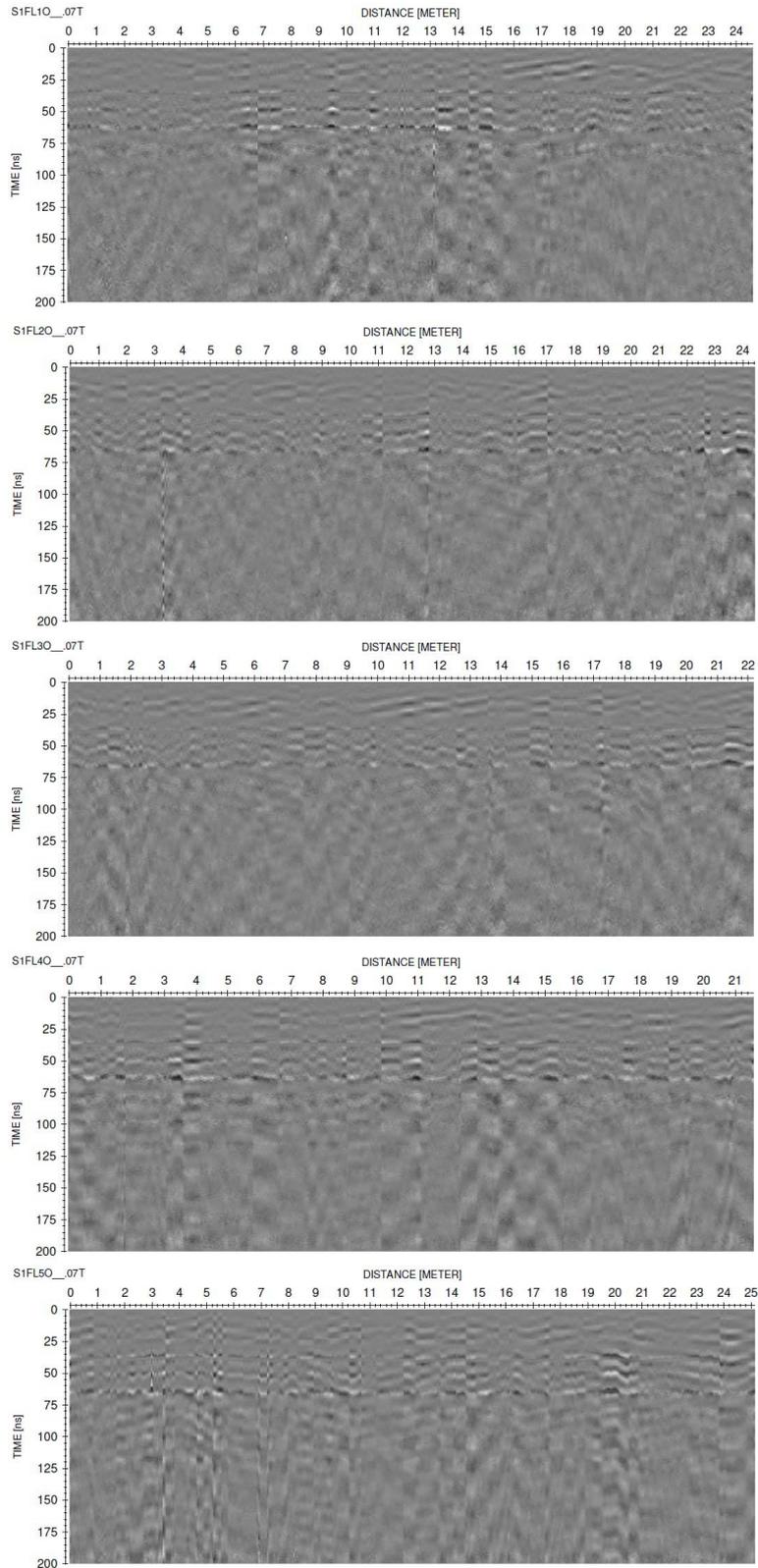


Figura 3.33: Perfis 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, feitos com a antena de GPR de 100 MHz na margem esquerda do Rio Sauípe.

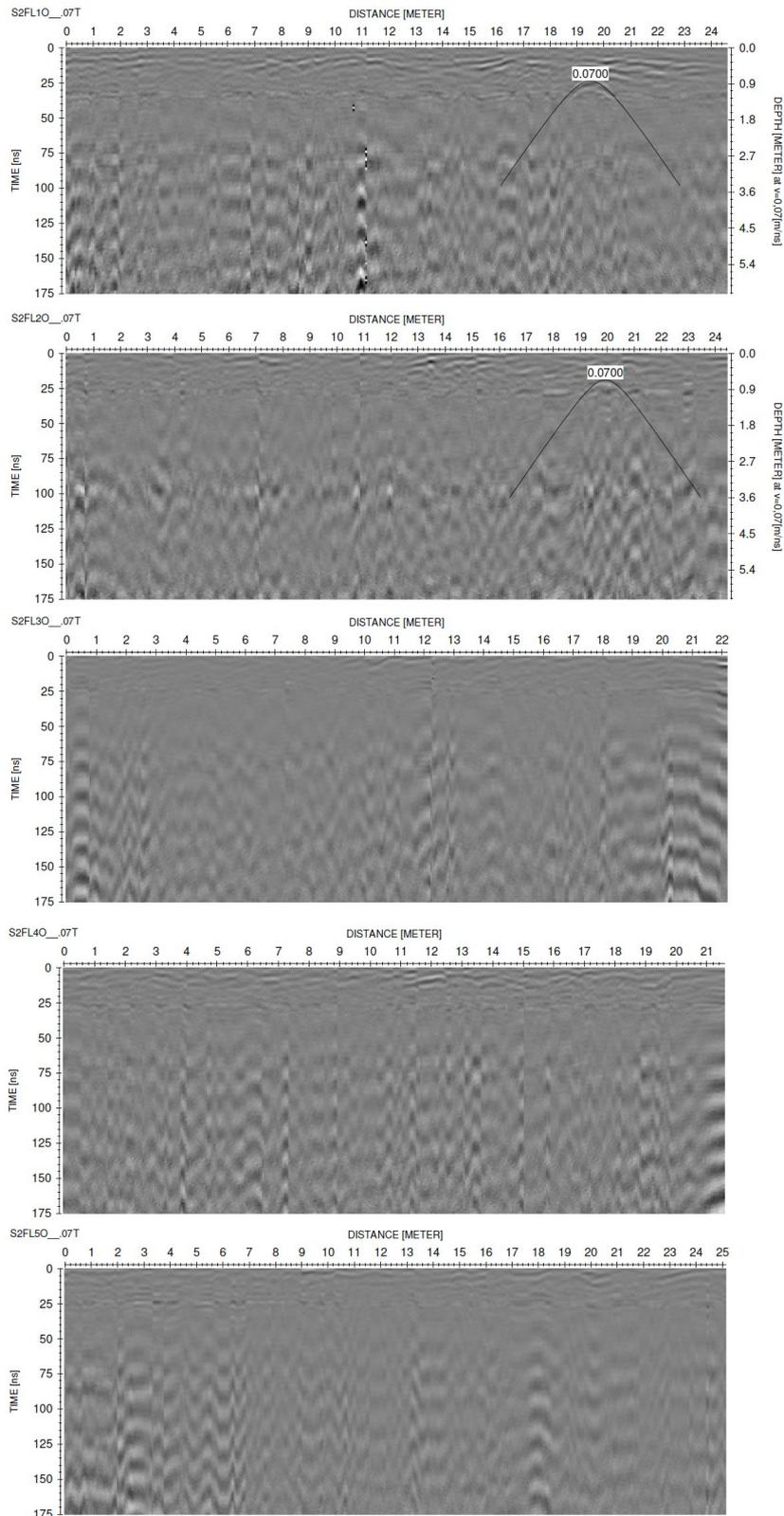


Figura 3.34: Perfis 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, feitos com a antena de GPR de 200 MHz na margem esquerda do Rio Sauípe.

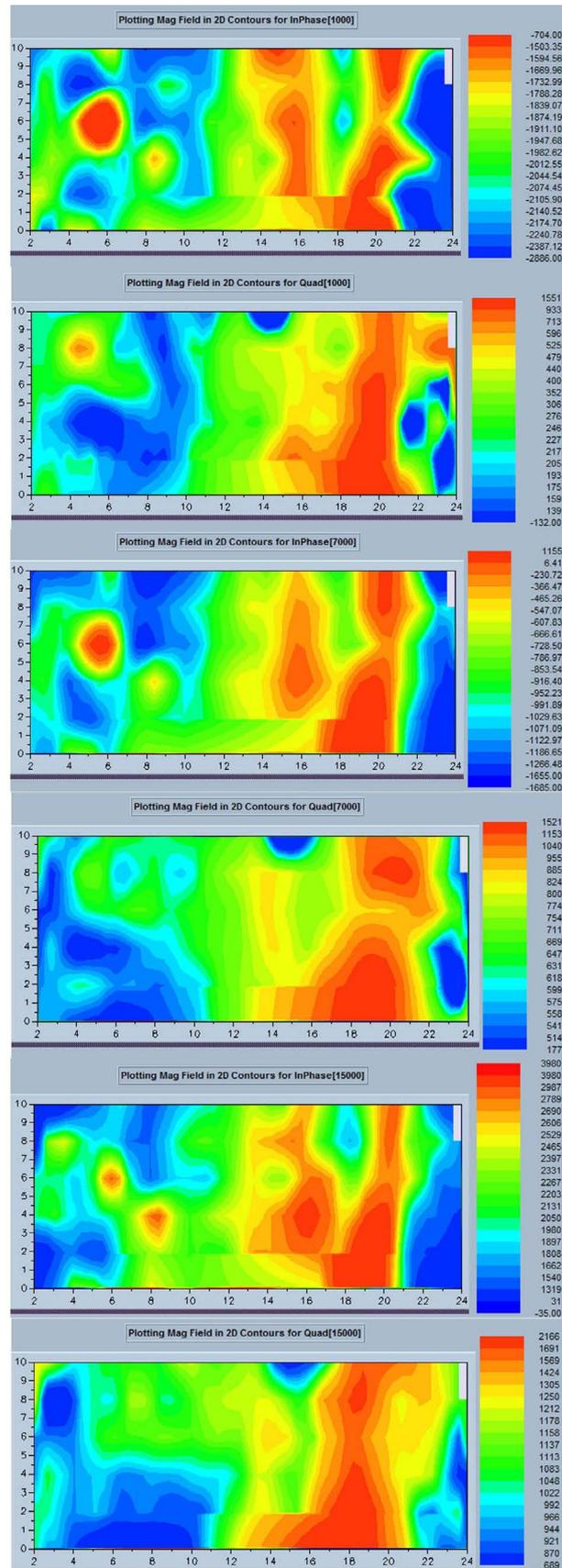


Figura 3.35: Trecho 1 da margem esquerda do Rio Sauípe para o Profiler EMP-400 com o arranjo de bobinas VDM *broadside*. São mostrados os mapas de contorno do campo eletromagnético para as medidas em fase e quadratura de 1000, 7000 e 15000 Hz.

CAPÍTULO 4

Conclusões

No rio Quiricó Grande o GPR apresentou bons resultados e foi mostrado que a capacidade em detectar dutos diminui com a proximidade do rio devido à maior atenuação do sinal, tendo como principal fator a causa da combinação entre a saturação em água do solo e o conteúdo de argila.

No rio Sauípe o GPR apresentou uma má qualidade dos radargramas e uma baixa capacidade em detectar dutos por causa da alta condutividade elétrica do terreno, que causou uma forte atenuação do sinal de radar.

Com o método GPR foi possível detectar os dutos e inferir sobre sua profundidade. As antenas de GPR com frequências de 100 e 200 MHz obtiveram um melhor resultado na detecção de dutos do que a antena de 400 MHz.

O método eletromagnético indutivo apresentou bons resultados nos dois rios, mas no rio Quiricó Grande o método apresentou uma maior definição dos dutos, portanto uma melhor qualidade dos dados e maior eficácia na detecção de dutos.

O arranjo VDM (momento de dipolo vertical) *broadside* foi o que obteve melhores resultados no mapeamento de dutos com o método eletromagnético indutivo.

Com o método eletromagnético indutivo não é possível saber sobre a profundidade dos dutos, mas é possível saber sobre a localização e alinhamento dos dutos metálicos.

As anomalias causadas pela carroça e pela placa metálica comprovam que objetos metálicos na superfície geram anomalias com o método eletromagnético, causando interferência nos dados.

O método eletromagnético indutivo foi capaz de mapear dutos em locais que o GPR não apresentou bons resultados, como foi observado no rio Sauípe. Desta forma é possível concluir que o método eletromagnético indutivo pode ser uma alternativa para localizar dutos metálicos onde o GPR falha.

A localização dos dutos pelos dois métodos coincidiu muito bem e o uso dos dois métodos em conjunto mostrou ser eficiente. O método eletromagnético mostrou ser útil para verificar se as hipérbolas que aparecem na seção de GPR estão relacionadas com dutos metálicos ou

com matacões, diminuindo assim a ambiguidade na interpretação dos dados de GPR.

Os trabalhos futuros que tenha como objetivo promover um melhor entendimento da aplicação dos dois métodos para detectar dutos exige que seja feita aquisições de dados em outras travessias e preferencialmente com diversos tipos de solos. Assim teremos um espectro mais amplo para tentar correlacionar a qualidade dos dados com o tipo de geologia do local.

Agradecimentos

Agradeço muito a Deus por me dar forças para vencer e ter colocado em minha vida muitas pessoas maravilhosas.

Agradeço muito aos meus pais por toda a dedicação, carinho e por sempre me mostrarem o caminho certo. A toda família, mesmo aos que estiveram longe, por me ensinar que a família é o bem mais importante que podemos ter na vida. A todos os avós, tios e primos, e agradeço especialmente à minha vó Delza e minha tia Monca por sempre estarem presentes, cuidando muito bem de mim. Ao meu pequeno grande irmão pelo companheirismo. À minha noiva Lai pela cumplicidade, por sempre me apoiar e me ajudar em todas as horas.

Agradeço a todos os meus amigos pelas horas de diversão e pelos conselhos. A todos os meus colegas pela convivência maravilhosa com muita união e companheirismo. Aos professores por ensinar o conhecimento intelectual, moral e ético, e por ter ajudado a me tornar uma pessoa melhor.

Agradeço especialmente ao professor Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho pela oportunidade e pela ajuda para a realização deste trabalho e à Dra. Jacira Cristina de Freitas Lucas por ser uma professora maravilhosa.

Agradeço à PETROBRAS/TRANSPETRO pelo apoio financeiro recebido através do termo de cooperação UFBA/PETROBRAS/FAPEX de número 0050.0051297.09.9, pelo qual fui beneficiado com bolsa de auxílio à pesquisa e pude usufruir dos equipamentos de geofísica adquiridos para a execução do referido projeto.

Muito obrigado a todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente nesta jornada.

Referências Bibliográficas

- Annan, A. P. (2001) Ground penetrating radar workshop notes, Sensors & Software Inc., Canada.
- Annan, A. P. e Cosway, S. W. (1992) Simplified gpr beam model for survey design, SEG Technical Program Expanded Abstracts, **11**(EG1.7):356–359.
- Annan, A. P. e Davis, J. L. (1976) Impulse radar soundings in permafrost, Radio Science, **11**:383–394.
- Bevan, B. W. e Kenyon, J. (1975) Ground penetrating radar for historical archaeology, MASCA Newsletter, **11**(2):2–7.
- Borges, W. R. (2007) Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: Estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP, Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Botelho, M. A. B. (2007) Prospecção de manganês com radar de penetração no solo (gpr) no oeste da bahia, 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Botelho, M. A. B. (2008) Manganese prospection with ground-penetrating radar (gpr) in bahia state brazil, 12th International Conference of Ground Penetrating Radar.
- Botelho, M. A. B. e Jorge, C. G. (2005) Avaliação geotécnica-geofísica das subestruturas da ferrovia vitória-minas (efvm) usando o radar de penetração no solo (gpr), 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Campbell, K. J. e Orange, A. S. (1974) A continuous profile of sea ice and freshwater ice thickness by impulse radar, Polar Record, **17**(106):34–41.
- Coon, J. B.; Fowler, J. C. e Shafers, C. J. (1981) Experimental uses of short pulse radar in coal seams, Geophysics, **46**:1163–1168.
- Darracott, B. W. e Lake, M. I. (1981) An initial appraisal of ground probing radar for site investigation in britain, Ground Engineering, **14**:14–18.
- Davis, J. L. e Annan, A. P. (1989) Ground-penetration radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophysical Prospecting, **37**(5):531–551.
- Davis, J. L.; Annan, A. P. e Vaughan, C. J. (1985) Placer exploration using radar and seismic methods, Can. Inst. Min. Bull., **80**:67–72.
- Harrison, C. H. (1970) Reconstruction of subglacial relief from radio echo sounding records, Geophysics, **35**:1109–1115.

- Jaya, M. S.; Botelho, M. A. B.; Hubral, P. H. W. e Liebhardt, G. (1999) Remigration of ground-penetrating radar data, *Journal of Applied Geophysics*, **41**:19–30.
- Jol, H. M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier, Netherlands.
- Kearey, P.; Brooks, M. e Hill, I. (2009) *Geofísica de exploração, Oficina de Textos*, São Paulo, Brasil.
- Keller, G. V. e Frischknecht, F. C. (1966) *Electrical methods in geophysical prospecting*, Pergamon Press, England.
- Leggo, P. J. e Leech, C. (1983) Subsurface investigations for shallow mine workings and cavities by the ground impulse radar technique, *Ground Engineering*, **16**:20–23.
- McCann, D. M.; Jackson, P. D. e Fenning, P. (1988) Comparison of the seismic and ground-probing radar methods in geological surveying, *IEE Proceedings*, **135**(f,4):380–390.
- Pestana, R. C. e Botelho, M. A. B. (1997) Migração de dados de radar (gpr) com correção topográfica simultânea, *Revista Brasileira de Geofísica (impresso)*, **15**(1):3–10.
- Pinto, M. V. (2007) *Imageamento de depósitos sedimentares análogos a reservatórios de hidrocarbonetos da Bacia do Recôncavo utilizando o GPR*, Trabalho final de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Porsani, J. L. (1999) *Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológicos-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado, SP*, Tese de doutorado, UNESP, Campus de Rio Claro, São Paulo, Brasil.
- Reynolds, J. M. (1997) *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley and Sons, England.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P. e Sheriff, R. E. (1990) *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Thierbach, R. (1974) Eletromagnetic reflections in salt deposits, *Journal of Geophysics*, **40**:633–637.
- Ulriksen, C. P. F. (1982) *Application of impulse radar to civil engineering*, Doctoral thesis, Lund University of Technology, 179p.
- Unterberger, R. R. (1978) Radar propagation in rock salt, *Geophysical Prospecting*, **26**(2):312–328.