



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**CLÍSTENES PAMPLONA CATETE**

**INVESTIGAÇÕES AMBIENTAL E FORENSE COM OS MÉTODOS GEOFÍSICOS  
RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO, POLARIZAÇÃO INDUZIDA E  
ELETORRESISTIVIDADE NO CEMITÉRIO DO TAPANÃ, BELÉM/PARÁ**

BELÉM

2010



CLÍSTENES PAMPLONA CATETE

**INVESTIGAÇÕES AMBIENTAL E FORENSE COM OS MÉTODOS GEOFÍSICOS  
RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO, POLARIZAÇÃO INDUZIDA E  
ELETRORRESISTIVIDADE NO CEMITÉRIO DO TAPANÃ, BELÉM/PARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geociências.

Área de Concentração: Geofísica

Orientadora: Profa. Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva

BELÉM

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

C359i Catete, Clístenes Pamplona

Investigações ambiental e forense com os métodos geofísicos radar de penetração do solo, polarização induzida e eletroresistividade no Cemitério do Tapanã, Belém/Pará / Clístenes Pamplona Catete; Orientador: Lúcia Maria da Costa e Silva – 2010  
89 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

1. Contaminação de cemitérios. 2. Geofísica ambiental. 3. Geofísica Forense. 4. Radar de Penetração do Solo (GPR). 5. Polarização Induzida (IP). 7. Cemitério do Tapanã (PA). I. Universidade Federal do Pará II. Silva, Lúcia Maria da Costa e, *orient.* III. Título.

CDD 20º ed.: 363.75098115

---

CLÍSTENES PAMPLONA CATETE

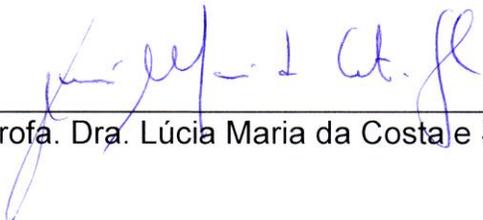
**INVESTIGAÇÕES AMBIENTAL E FORENSE COM OS MÉTODOS GEOFÍSICOS  
RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO, POLARIZAÇÃO INDUZIDA E  
ELETRORRESISTIVIDADE NO CEMITÉRIO DO TAPANÃ, BELÉM/PARÁ**

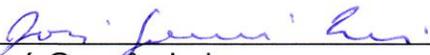
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade  
Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências  
para obtenção do grau de Mestre em Geociências.

Área de Concentração: Geofísica

Data de aprovação: 30/04/2010.

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva (Orientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Gouvêa Luiz

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

BELÉM

2010

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer primeiramente a minha Família e a Deus, por essa oportunidade de fazer um curso de pós-graduação.

A orientadora, Profa. Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva, pela paciência e dedicação, sobretudo pelas idéias que possibilitou um melhor desenvolvimento desta dissertação.

Ao Prof. Dr. José Gouvêa Luis, pela colaboração nas atividades de campo, bem como sugestões que foram dadas para o enriquecimento deste trabalho.

Ao Prof. Nélio, pelos esclarecimentos na parte de Polarização Induzida e na operação do equipamento geofísico Imagiador.

Ao professor Dr. Welitom Rodrigues Borges, pelas dicas na utilização do Software ReflexW e auxílio na coleta dos dados de campo.

A Sra. Meyre Esther Mendes Chagas, diretora do Departamento de Necrópoles da Prefeitura Municipal de Belém Departamento de Necrópoles (DANE), e ao Dr. Oséas Batista da Silva Junior Secretário Municipal de Administração (SEMAD), pela concessão da área para os testes.

Ao Dr. Luis Carlos de Araújo Loureiro, coordenador de Perícia no Morto do Instituto Médico Legal (IML), pela liberação de material para o estudo.

Aos colegas da Pós-Graduação, Waldemir Nascimento, João Andrade, Gerson Pompeu, Márcio Antunes, Diógenes Brasil, Saulo Martins, Diego Miranda e Danusa Mayara, pelo suporte e os momentos vivenciados.

Aos ex- alunos e agora geofísicos Alex Raiol e Anderson Santiago, pela ajuda na coleta de dados e também nos primeiros passos com alguns softwares.

Ao Instituto de Geofísica, por oferecer um espaço físico estruturado e toda parte operacional, sendo necessário destacar o apoio do técnico de laboratório e agora companheiro de trabalho Paulo Magalhães e da secretária Benildes Lopes.

A Profa. Aurora Mota, pelo fornecimento dos dados de precipitação da área em estudo durante o período que ocorreram os levantamentos.

A minha mãe, meu pai, minha irmã, meu avô, que não poderiam ser esquecidos, pelo muito que me ajudaram para eu chegar aqui, e, também, ao meu sogro e a minha sogra.

Para finalizar, às duas coisas mais importantes da minha vida, minha esposa Elaine Valéria dos Santos Nascimento Catete, e nossa filhinha Maryssa dos Santos Nascimento Catete, pelo apoio e compreensão da minha ausência em muitos momentos.

## RESUMO

Os cemitérios são considerados fontes potenciais de contaminação da água subterrânea. Desde que o uso da geofísica no mapeamento do nível hidrostático (NH) se tornou uma ferramenta muito importante para o monitoramento ambiental, tem sido possível verificar as áreas adequadas ou inadequadas para sepultamentos nos cemitérios. Por outro lado, o uso da geofísica na localização de cavidades subterrâneas e túneis clandestinos pode ser de utilidade para a ciência forense. Neste trabalho, foram aplicados métodos geofísicos para mapeamento do NH em um cemitério e encontrar estruturas enterradas relacionados com a ciência forense. O Radar de Penetração do Solo (GPR) foi utilizado no mapeamento do NH em todo o cemitério do Tapanã, enquanto a Polarização Induzida (IP) e a Eletrorresistividade foram aplicadas em um campo de teste construído naquele cemitério para estudos Forense, Ambiental e Resgate. Os resultados obtidos com o GPR mostraram que a profundidade do NH no cemitério do Tapanã varia de 7 m, na parte mais alta do terreno, a 1 m, na parte mais baixa. O IP evidenciou melhor o enterramento de um corpo do que um túnel. A Eletrorresistividade foi eficaz, tanto para a localização do corpo enterrado, quanto do túnel, com uma melhor definição do túnel. Os métodos apresentaram bons resultados, mesmo com a presença da camada de intemperismo rica em argila, que normalmente ocorre na região amazônica.

Palavras-Chave: Contaminação de Cemitério. Geofísica Ambiental. Geofísica Forense. Radar de Penetração do Solo (GPR). Polarização Induzida (IP). Cemitério do Tapanã.

## **ABSTRACT**

The cemeteries are considered potential sources of underground water contamination. Since the use of geophysics in the mapping of the hydrostatic level (HL) has become a very important tool in the environmental monitoring, it makes possible to verify adequate or inadequate areas for burials in cemeteries. In the other hand, the localization of underground clandestine hollows and tunnels, can be of utility for the Forensic Science. In this work, geophysical methods were applied for mapping the HL in a cemetery and to find buried structures related to the Forensic Science. Ground Penetrating Radar (GPR) was used in the mapping of the HL in the whole Tapanã cemetery, while the resistivity and induced polarization (IP) methods were applied on a test site built in that cemetery for forensic, environmental and resgate related geophysical studies. The results with the GPR showed that the HL depth in the Tapanã cemetery varies from 7 m, at high topographic levels, to 1 m, at low topographic levels. The IP was sensible to the presence of a body buried in a shallow hollow as the clandestine hollows are and showed only fair results for a tunnel. The resistivity was effective for both the buried body and the tunnel, with better definition of the tunnel. The methods gave good results even within the weathering layer rich in clay that normally occurs in the Amazon region.

**Keywords:** Cemetery contamination. Environmental Geophysics. Forensic Geophysics. Ground Penetrating Radar (GPR). Induced polarization (IP). Tapanã cemetery.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Campo de Testes FORAMB. Levantamento GPR.....	24
Figura 3.2 - Campo de Testes FORAMB. Levantamento IP e Eletrorresistividade.....	24
Figura 3.3 - Perfil esquemático e respectivos alvos enterrados no FORAMB.....	26
Figura 3.4 – Foto do cadáver humano, envolto em uma lona plástica, enterrado no FORAMB, Belém/Pará. ....	26
Figura 3.5 – Caixa simulando túnel no campo de teste FORAMB. ....	27
Figura 3.6 – Caixa com metais simulando armas enterradas no campo de teste FORAMB. ....	28
Figura 4.1 - Mapa de localização do cemitério do Tapanã. ....	29
Figura 4.2- Modelo topográfico do cemitério do Tapanã. ....	30
Figura 4.3 - Representação temporal em 1, 2, 5, 10, 15 e 20 dias da precipitação na área de estudo. ....	31
Figura 4.4 - Igarapé Bacuri localizado à jusante do cemitério do Tapanã. ....	33
Figura 4.5 - Litoestratigrafia do cemitério do Tapanã . ....	34
Figura 5.1 - Relação entre a velocidade e frequência para diferentes condutividades. ....	40
Figura 5.2 - Antenas (a) monoestática, e (b) biestática.....	41
Figura 5.3 - Arranjos usados nos levantamentos GPR.....	42
Figura 5.4 - Localização dos perfis GPR no cemitério do Tapanã e do perfil no FORAMB. ....	43
Figura 5.5 – Aquisição de dados de GPR no cemitério do Tapanã, perfil na passarela principal (cimento) . ....	43
Figura 5.6 - Aquisição de dados de GPR no cemitério do Tapanã, perfil no Residencial Rio Volga (grama). ....	44
Figura 5.7- a) Perfil 1 bruto (apenas com correção estática). b) Perfil processado. c) Perfil interpretado (macrofeições-Grês do Pará- GP e Nível Hidrostático-NH). ....	50
Figura 5.8- Detalhamento do radargrama interpretado do Perfil 1: a) Perfil 1a, b) Perfil 1b e c) Perfil 1c. GP- Grês do Pará e NH- Nível Hidrostático. ....	51
Figura 5.9- Radargramas obtidos no Perfil 2: a) Bruto (apenas com correção estática), b) Processado e c) Interpretado. Feições: Grês do Pará - GP e Nível Hidrostático – NH. ....	52
Figura 5.10- Radargramas obtidos no Perfil 3: a) Bruto (apenas com correção estática), b) Processado e c) Interpretado. Feições: Grês do Pará - GP e Nível Hidrostático – NH. ....	53
Figura 5.11- Radargramas obtidos no Perfil 4: a) Bruto (apenas com correção estática), b) Processado e c) Interpretado. Feições: Grês do Pará – GP. ....	54
Figura 5.12- a) Perfil 5 bruto (apenas com correção estática). b) Perfil processado. c) Perfil interpretado (macrofeições-Grês do Pará- GP e Nível Hidrostático-NH). ....	55
Figura 5.13- Detalhamento do radargrama interpretado para o Perfil 5: a) Perfil 5a, b) Perfil 5b, c) Perfil 5c, d) Perfil 5d, Feições: Grês do Pará- GP e Nível Hidrostático–NH. ....	56
Figura 5.14- Representação do nível hidrostático (abaixo) e da topografia (acima) para a área do cemitério do Tapanã. ....	58
Figura 6.1- Fenômeno de IP- Polarização de membrana. ....	60
Figura 6.2- Fenômeno IP- Polarização de eletrodo; grão metálico em rosa. ....	60
Figura 6.3- Resistividade aparente de alguns materiais geológicos. ....	61
Figura 6.4- Arranjo Schlumberger. ....	62
Figura 6.5- Arranjo Wenner. ....	62
Figura 6.6- Arranjo Wenner-Schlumberger. ....	63
Figura 6.7- Medida de IP no domínio do tempo.....	64

Figura 6.8- Equipamento de Eletrorresistividade utilizado na aquisição de dados de resistividade elétrica e cargabilidade.....	66
Figura 6.9- Aquisição de dados de IP e Resistividade.....	66
Figura 6.10- IP. Cargabilidade medida: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008.....	69
Figura 6.11- IP. Cargabilidade calculada: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) Dezembro/2008.....	70
Figura 6.12- IP. Modelo físico solução da inversão: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008.....	71
Figura 6.13- Eletrorresistividade. Resistividade aparente medida: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008.....	73
Figura 6.14- Eletrorresistividade. Resistividade aparente calculada: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008.....	74
Figura 6.15- Eletrorresistividade. Modelo físico solução da inversão: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008.....	75

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
2	<b>IMPACTOS AMBIENTAIS DE CEMITÉRIOS</b> .....	16
2.1	PROCESSOS TRANSFORMATIVOS E CONSERVATIVOS DE CADÁVERES .....	16
2.2	NECROCHORUME .....	17
2.3	LEGISLAÇÃO AMBIENTAL APLICADA A CEMITÉRIOS .....	19
3.	<b>GEOFÍSICA APLICADA</b> .....	21
3.1	GEOFÍSICA AMBIENTAL .....	21
3.2	GEOFÍSICA FORENSE.....	22
3.3	CAMPOS DE TESTES .....	23
3.3.1	<b>FORAMB</b> .....	25
4	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	29
4.1	LOCALIZAÇÃO E ACESSO .....	29
4.2.1	<b>Relevo</b> .....	30
4.2.2	<b>Clima</b> .....	31
4.2.3	<b>Hidrografia</b> .....	32
4.2.4	<b>Geologia</b> .....	32
5	<b>MÉTODO GPR</b> .....	35
5.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	35
5.2	AQUISIÇÃO DE DADOS .....	40
5.2.1	<b>Arranjos</b> .....	40
5.2.2	<b>Campanha de Campo</b> .....	41
5.3	PROCESSAMENTO.....	44
5.4	INTERPRETAÇÃO .....	45
5.4.1	<b>Perfil 1</b> .....	46
5.4.2	<b>Perfil 2</b> .....	47
5.4.3	<b>Perfil 3</b> .....	47
5.4.4	<b>Perfil 4</b> .....	48
5.4.1	<b>Perfil 5</b> .....	48

5.5	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS DO GPR .....	57
6	<b>MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA E DA ELETRORRESISTIVIDADE</b>	
	59	
6.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	59
6.1.1	<b>Polarização Induzida</b> .....	59
6.1.2	<b>Eletorresistividade</b> .....	60
6.2	AQUISIÇÃO DE DADOS .....	61
6.2.1	<b>Arranjos</b> .....	61
6.2.2	<b>Medidas de IP</b> .....	63
6.2.3	<b>Medidas de Eletorresistividade</b> .....	64
6.2.4	<b>Campanhas de Campo</b> .....	64
6.3	INTERPRETAÇÃO .....	67
6.3.1	<b>IP</b> .....	67
6.3.1	<b>Resistividade Aparente</b> .....	72
7	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	76
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	78
	<b>ANEXOS</b> .....	83
	<b>ANEXO A- PSEUDO-SEÇÕES DE CARGABILIDADE MEDIDA</b> .....	84
	<b>ANEXO B- PSEUDO-SEÇÕES DE CARGABILIDADE CALCULADA</b> .....	85
	<b>ANEXO C- MODELOS FÍSICOS OBTIDOS COM A INVERSÃO DAS PSEUDO-SEÇÕES DE CARGABILIDADE MEDIDA</b> .....	86
	<b>ANEXO D- PSEUDO-SEÇÕES DE RESISTIVIDADE APARENTE MEDIDA</b> .....	87
	<b>ANEXO E- PSEUDO-SEÇÕES DE RESISTIVIDADE APARENTE CALCULADA</b> .....	88
	<b>ANEXO F- MODELOS FÍSICOS OBTIDOS COM A INVERSÃO DAS PSEUDO-SEÇÕES DE RESISTIVIDADE APARENTE MEDIDA</b> .....	89

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento urbano e industrial sem planejamento gera um aumento dos problemas ambientais que, por sua vez, estimula a busca de ferramentas para estudo do meio ambiente, visando a sua preservação. Esse quadro fomenta tanto o aprimoramento quanto o desenvolvimento de ferramentas de investigação que possibilitem análises rápidas, eficientes e de baixo custo.

Entre os problemas ambientais, destaca-se a degradação das águas superficiais e subterrâneas (aquíferos), que tornam o aproveitamento da água cada vez mais oneroso para a sociedade. A contaminação de aquíferos é mais preocupante do que a das águas superficiais, visto que estas podem se renovar e se recuperar após cessar o lançamento de efluentes, enquanto a contaminação da água subterrânea é praticamente irreversível a curto e médio prazo, porque as técnicas de recuperação de aquíferos degradados são muito complexas, onerosas, demoradas e a autodepuração, por sua vez, é lenta.

As principais fontes de contaminação em áreas urbanas são: fossas sépticas, resíduos sólidos (chorume em lixões), postos de gasolina, efluentes industriais, cemitérios (necrochorume) e outros.

Uma ferramenta relativamente nova para a investigação desses tipos de contaminação é a Geofísica. A Geofísica Ambiental tem como objetivo prover uma ampla visão de subsuperfície, complementando informações provenientes de sondagens de maneira não invasiva.

Os objetivos principais da Geofísica Ambiental são:

- i. mapeamento da subsuperfície de áreas suspeitas de contaminação antrópica;
- ii. prevenção de impactos ambientais, que se baseia na seleção de áreas adequadas à implantação de projetos potencialmente poluidores; e
- iii. monitoramento ambiental de áreas com potencial de poluição dos recursos ambientais, tais como lixões, postos de gasolina, cemitérios, etc.

Neste trabalho interessa destacar que a Geofísica, mais recentemente, vem também fomentando estudos sobre a sua utilidade para desvendar crimes diversos na região amazônica (COSTA, 2009; NASCIMENTO, 2009; O DIÁRIO DO PARÁ, 2009).

A Geofísica Forense utiliza vários métodos geofísicos (magnético, eletromagnéticos, sísmico de refração e microgravimétrico) para buscar evidências ou pistas de delitos (PIRES, 2001). Os objetivos principais da Geofísica Forense são:

- i. localização de restos humanos ou caixões enterrados;
- ii. localização de paredes falsas, vazios ou espaços camuflados em construções;
- iii. mapeamento de túneis em subsuperfície; e
- iv. localização de projéteis, cápsulas, armas e outros objetos metálicos, escondidos geralmente em subsuperfície.

Estudos ambientais bem como estudos forenses têm em comum a necessidade do uso de métodos que não destruam e nem afetem significativamente a área investigada. Além disso, é sempre desejada a obtenção de dados a baixo custo e com rapidez.

Esta dissertação tem como objetivo fornecer subsídios a estudos ambientais e forenses. O local escolhido foi o cemitério municipal rotativo do Tapanã em Belém do Pará, em operação desde 26 de setembro de 1996 com média de sepultamento de 20 corpos/dia e de exumação de 6 a 8 corpos/dia, um total de sepultamentos de cerca de 15.000 corpos, sendo a capacidade total de 22.000 sepulturas (BELÉM, 2008).

Estudos ambientais em cemitérios têm, comumente, dois objetivos. O primeiro é a detecção do nível freático ou hidrostático (NH) ou nível d'água (NA), que corresponde à profundidade a que a água se encontra numa determinada região, isto é, à profundidade do topo do chamado aquífero livre ou freático. Outro objetivo, cada vez mais comum, é a investigação de contaminação do meio pelo líquido resultante da decomposição de cadáveres, conhecido como necrochorume.

A contaminação do meio pelo necrochorume ocorre devido à implantação de cemitérios em locais que apresentam condições hidrogeoambientais desfavoráveis, como nível freático muito próximo da superfície (daí a importância de se conhecer o comportamento do NH na área), solos muito permeáveis e porosos, etc.

A investigação da situação de 600 cemitérios do país (75% municipais e 25% particulares) mostrou que 15% a 20% deles estavam contaminando a subsuperfície com o

necrochorume produzido pela decomposição dos corpos. Desse percentual, cerca de 60% dos cemitérios problemáticos era municipal (SILVA, 1995).

Devido à falta de planejamento e de gestão ambiental, muitos cemitérios públicos se tornaram áreas degradadas: um exemplo, clássico, é o cemitério rotativo municipal São José, popularmente conhecido como cemitério do Bengui, em Belém do Pará, cujas atividades foram encerradas com o apoio de estudos geofísicos, porque o NH no inverno alcança as sepulturas, contaminando o meio (CARVALHO JUNIOR; SILVA, 1996 e CARVALHO JUNIOR, 1997).

Por isso, as aplicações de métodos geofísicos em cemitérios têm crescido. No cemitério do Tapanã, Damasceno (2001) utilizou método elétrico (Eletrorresistividade em caminhamentos elétricos e sondagens elétricas verticais) a fim de mapear e localizar as áreas mais próximas do aquífero livre, cuja profundidade é de aproximadamente 7 m a montante (oeste) do cemitério e cai acentuadamente para jusante (leste). Nascimento (2009), por sua vez, utilizou os métodos eletromagnéticos radar de penetração do solo (ou, simplesmente, GPR de Ground Penetrating Radar) e Slingram (EM- 34-3) em seus estudos no FORAMB (um campo de testes construído no cemitério do Tapanã em Belém/Pará), revelando com o GPR o aquífero a uma profundidade de aproximadamente 1 m (jusante do cemitério) e o deslocamento ao longo do tempo do necrochorume nas imediações do corpo no sentido do fluxo da água. Nascimento (2009) mostra também um teste da aplicação do GPR na localização do NH no cemitério do Bengui. Esse é provavelmente o primeiro trabalho sobre a viabilidade do uso do GPR na localização do NH em cemitérios, a fim de se evitar sondagens excessivas para mapeá-lo (mais lentas e dispendiosas).

Aplicações de métodos geofísicos para fins forenses são mais incomuns. Os primeiros trabalhos acadêmicos no Brasil foram realizados no cemitério do Tapanã, no campo de testes controlados para Geofísica Forense, Ambiental e de Resgate (FORAMB) (SILVA et al., 2008). Costa (2009) experimentou localizar os alvos do FORAMB com métodos geofísicos rápidos e de baixíssimo custo (Potencial Espontâneo, Eletrorresistividade e Cintilometria). Nascimento (2009) mostrou que o GPR permite mais efetivamente a detecção e o monitoramento dos mesmos alvos ao longo do tempo.

Nesta dissertação são apresentados os resultados obtidos com o método eletromagnético GPR e os métodos elétricos da Polarização Induzida (IP) e da

Eletrorresistividade. O alvo do estudo com o GPR foi o mapeamento do nível hidrostático em todo o cemitério do Tapanã, que difere sobremaneira do cemitério do Bengui. Este último possui o NH extremamente próximo da superfície, pois foi construído em uma área de onde foram extraídos materiais para construção, que foi nivelada e recebeu aterro posteriormente. O cemitério do Tapanã, por sua vez, é uma área sem ação antrópica em que o NH mostra-se variando em termos de profundidade, em virtude da declividade do terreno. O IP e a Eletrorresistividade, por sua vez, foi aplicado no sítio controlado FORAMB com finalidade tanto forense como ambiental.

## 2 IMPACTOS AMBIENTAIS DE CEMITÉRIOS

Os cemitérios têm que ser analisados quanto ao impacto ambiental que promovem bem como vários outros, como o impacto social, urbanístico, econômico e psicológico, quando da sua implementação. O impacto ambiental, foco deste trabalho, está relacionado aos processos transformativos e conservativos que ocorrem com os cadáveres, em maior ou menor escala, dependendo do meio físico (clima, geologia, relevo e outros).

### 2.1 PROCESSOS TRANSFORMATIVOS E CONSERVATIVOS DE CADÁVERES

Entre os processos transformativos, destacam-se: a autólise e a putrefação.

A **autólise** se manifesta uma vez cessada a circulação sanguínea. As células do sangue, prejudicadas pela ausência de trocas nutritivas de novos elementos que deixam de receber pela corrente plasmática, sofrem pela ação dos fermentos a acidificação. Esse fato é explicado como fenômeno resultante da predominância de íons  $H^+$  sobre os íons  $OH^-$  nos tecidos e líquidos do cadáver, dessa forma, a variação do Potencial Hidrogeniônico (PH) dos tecidos é um evidente sinal de morte (FRANÇA, 1985).

A **putrefação** ocorre após a autólise, iniciando-se pelos intestinos. Essa fase é regida por fenômenos biológicos e físico-químicos em que atuam microrganismos vivos que podem ser aeróbios, anaeróbios ou facultativos. O fenômeno de putrefação compreende quatro períodos distintos: de coloração, gasoso, coliquativo e de esqueletização (FÁVERO, 1991).

O início da putrefação se dá pelo período da coloração, no qual ocorre o surgimento de manchas verdes em decorrência da produção de gases pelos microrganismos alocados no início do intestino grosso, a qual posteriormente se difunde pelo tronco, cabeça e membros. A coloração esverdeada escura é um aspecto típico e deve-se à reação do gás sulfídrico ( $H_2S$ ) com a hemoglobina, formando a sulfometemoglobina nos tecidos (SILVA, 1995). Em geral, este período pode durar até sete dias após o óbito.

O período gasoso inicia-se com o surgimento de gases no interior do cadáver, expandindo-se por todo o corpo; o acúmulo de gases faz com que o cadáver aumente seu volume.

O período coliquativo é o período da dissolução pútrica do cadáver, devido à desintegração progressiva dos tecidos, no qual as partes moles diminuem de volume, o que resulta num efluente líquido intermitente, denominado necrochorume.

O período de esqueletização é determinado pela ação continuada dos germes e insetos e da ação do meio ambiente. Os tecidos reduzem-se ainda mais, até que o cadáver apresente os ossos livres, unidos apenas pelos ligamentos (MIOTTO, 1990).

No que diz respeito aos fenômenos conservativos, tem-se: a mumificação e a saponificação.

A **Mumificação** é a dessecação ou desidratação dos tecidos, característica de clima quente, seco, com correntes de ar. Existem determinados tipos de solos que propiciam a mumificação, como os solos arenosos das regiões desérticas.

A **Saponificação**, por sua vez, envolve a hidrólise da gordura com liberação de ácidos graxos, os quais, pela acidez, inibem as bactérias putrefativas, atrasando a decomposição do cadáver (MATOS, 2001). Um ambiente quente úmido e anaeróbio, assim como a presença de bactérias endógenas, favorece a saponificação. O solo argiloso, pouco permeável, quando saturado de água facilita esse tipo de fenômeno (SILVA, 1995).

Na Amazônia, a umidade excessiva e a presença de manto de intemperismo rico em argila, independentemente do nível hidrostático, provocam a saponificação (NASCIMENTO, 2009). A saponificação torna intermitente a produção do necrochorume prolongando a sua geração. Consequentemente, o processo de putrefação é retardado e a contaminação cemiterial prolongada.

## 2.2 NECROCHORUME

O necrochorume corresponde a um líquido viscoso mais denso que a água (1,23 g/cm<sup>3</sup>), rico em sais minerais e substâncias orgânicas degradáveis, de coloração castanho acinzentado, polimerizável, de cheiro acre forte e grau variado de patogenicidade (SILVA, 1994; MATOS, 2001).

O necrochorume é constituído por cerca de 60% de água, 30% de sais e 10% de substâncias orgânicas (SILVA, 1998). Com a decomposição das substâncias orgânicas presentes

no necrochorume, são geradas várias diaminas, mas as mais preponderantes são as mais tóxicas: a putrescina ( $C_4H_{12}N_2$ ) e a cadaverina ( $C_5H_{14}N_2$ ), que podem ser degradadas, gerando amônia ( $NH_4^+$ ).

A composição do necrochorume produzido pelo corpo de um homem adulto de 70 kg pode ser conferida na Tabela 2.1. A produção de necrochorume de, aproximadamente, 0,6 l/kg (SILVA, op. cit.).

O necrochorume contém número elevado de microrganismos degradadores de matéria orgânica. Esses podem veicular doenças diversas, em princípio, todas de veiculação hídrica. O Quadro 2.1 reúne as principais dessas doenças.

Há várias análises de amostras de água do aquífero freático de diversos cemitérios mostrando sua contaminação por microrganismos, por exemplo, em Braz et al. (2000) em sua investigação do cemitério do Bengui.

Matos (2001), por sua vez, trabalhando com o aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, encontrou também vários microrganismos (bactérias heterotróficas, proteolíticas, clostrídios sulfito-redutores, enterovírus e adenovírus) bem como que a condutividade elétrica aumenta nas águas próximas de sepulturas, o que seria de se esperar devido à presença de sais no necrochorume. Silva e Souza (2008), no entanto, trabalhando no cemitério do Tapanã, não detectaram aumento da condutividade do terreno em zonas de sepultamentos na fase de liberação de necrochorume com método eletromagnético (Slingram – EM34).

Tabela 2.1- Composição do necrochorume.

Substância	Quantidade
Carbono	16.000 g
Nitrogênio	1.800 g
Cálcio	1.100 g
Fósforo	500 g
Enxofre	140 g
Potássio	140 g
Sódio	100 g
Cloreto	95 g
Magnésio	19 g
Ferro	4,2 g
Água	70% a 74%

Fonte: Dent (1998); Knight (1998); Silva (2008)

Quadro 2.1 - Principais doenças de veiculação hídrica relacionadas a cemitérios.

Tipo	Transmissor	Características	Doença
Protozoários	<i>Cryptosporidium</i>	Resistente à cloração	Gastrenterite
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Locomove-se e alimenta-se por meio de pseudópodes	Amebíase
	<i>Giárdia lamblia</i>	Apresenta simetria bilateral	Gastrenterite
Bactérias	<i>Escherichia coli</i>	Bacilo reto, gram-negativo, anaeróbio facultativo	Diarréia e dores abdominais
	<i>Legionella pneumophila</i>	Bacilo, gram-negativo, aeróbio	Pneumonia e febre
	<i>Leptospira interrogans</i>	Célula em forma de hélice flexível, gram-negativo, aeróbio	Leptospirose
	<i>Salmonella typhi</i>	Gram-negativo, anaeróbio facultativo	Febre tifóide.
	<i>Shigella dysenteriae</i>	Bacilo reto, anaeróbio facultativo, gram-negativo	Febre intestinal, gastrenterite, disenteria
	<i>Vibrio cholerae</i>		Cólera
Vírus	<i>Adenovírus</i>	Resistente no ambiente	Infecções respiratórias
	<i>Echo humano</i>		Meningite, doenças respiratórias, erupções cutâneas, diarréia, febre
	<i>Hepatite A</i>	Muito estável, resistente em meio ácido e em elevada temperatura	Hepatite e gastrenterite
	<i>Poliovírus humano</i>		Paralisia, meningite, febre
	<i>Reovírus</i>	Icosaedro, mas muitos apresentam a forma esférica. Relativamente estáveis	Infecções do trato respiratório superior, enterite em crianças e bebês
	<i>Rotavírus grupo B</i>	Icosaedro, estável até o pH 3 e relativamente resistente ao calor	Gastrenterite

Fonte: Matos (2001)

### 2.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL APLICADA A CEMITÉRIOS

Os cemitérios públicos são bens do patrimônio administrativo indisponível, de uso especial, que se destinam à execução de serviços com finalidade pública permanente, não integrada propriamente à administração, mas constituindo o aparelho administrativo (CARVALHO FILHO, 2005).

Os cemitérios particulares são assentados em terrenos de domínio particular e, para sua operação, devem estar submetidos ao controle do Poder Público, pelo fato de haver em suas áreas prestação de um serviço público específico (CARVALHO, op. cit.).

Em âmbito nacional, o CONAMA publicou a Resolução nº 335 de 03 de abril de 2003, que estabelece critérios gerais para o licenciamento ambiental dos cemitérios (Anexo 1). A Resolução 335 foi revisada pela Resolução nº 368 de 28 de março de 2006 (Anexo 2). A resolução nº 368 altera os Artigos 1º, 3º, 5º, 11º e 12º da resolução nº 335, destacando-se que ela remete a cada Estado editar normas específicas para sua regulamentação e que os gestores de cemitérios tiveram ampliado até dezembro de 2010 o prazo para a regularização dessas áreas (Art. 11º).

O Estado do Pará, contudo, já possuía, antes mesmo da primeira Resolução do CONAMA, um termo de referência para a implantação de cemitérios horizontais no Estado do Pará (DAMASCENO et al., 1996; NASCIMENTO, 2009), além da lei 5.887 de 9 de Maio de 1995, que dispõe sobre a política estadual de meio ambiente.

Um aspecto importante para o presente trabalho é o da distância do fundo da sepultura ao nível freático. A resolução CONAMA 335/2003 e 338/2006 estabelecem que a base da sepultura deva estar pelo menos, 1,5 m acima do nível freático, medido no fim da estação de chuvas. Já o termo de referência para a implantação de cemitérios horizontais do Estado do Pará estabelece que essa distância é, no mínimo, de 2,0 m.

Outro fator importante que deve ser observado na legislação é o tempo para a exumação de corpos. Em geral, a legislação brasileira estabelece prazos que podem variar de 3 e 5 anos, como mostra o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Tempo para exumação de corpos em alguns municípios do Brasil

Cidade/Estado	Lei/mês/ano	Tempo de Exumação
Belém (PA)	7.055/12/1977	5 anos adultos 3 anos criança
Santos (SP)	3.531/04/1968	5 anos adultos 3 anos criança
Governador Valadares (MG)	3.840/12/1993	4 anos
Vitoria (ES)	2.481/02/1977	3 anos

Fonte: Nascimento (2009)

### 3 **GEOFÍSICA APLICADA**

A geofísica pode ser aplicada a várias áreas do conhecimento, entre as quais: geologia (prospecção de petróleo, minerais-minério e água subterrânea), arqueologia, geotecnia, meio ambiente (planejamento e monitoramento de aterros sanitários, postos de gasolina, cemitérios, etc.).

#### 3.1 **GEOFÍSICA AMBIENTAL**

Os métodos geofísicos são ferramentas consagradas de investigação do meio físico, amplamente empregadas no diagnóstico e monitoramento de áreas que tiveram água subterrânea e solo contaminados, sempre em conjunto com técnicas diretas de investigação, como análises químicas. Em geral, a realização de levantamentos geofísicos tem por objetivo básico a identificação de possíveis zonas com propriedades físicas que indiquem contaminação da água subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados (CETESB, 2001).

Dessa forma, as informações derivadas dos levantamentos geofísicos são úteis para a locação dos poços de monitoramento, como também para o cálculo da área e do volume para remoção e remediação de solos contaminados. Além disso, ajudam a reduzir o risco de perfuração de tambores, canos, tanques e galerias subterrâneas.

A Geofísica vem também experimentando utilização crescente nos estudos que precedem a instalação de diversos empreendimentos. Para a instalação de áreas de disposição de resíduos, por exemplo, é necessária a realização de estudos detalhados sobre as características do meio físico relacionadas à sua capacidade de atenuar a carga de contaminantes dos resíduos e de isolá-la de possíveis aquíferos, bem como das águas de uma maneira geral. Para tanto é necessário conhecer os materiais geológicos e suas características geotécnicas, hidrogeológicas e físico-químicas, assim como seu posicionamento subsuperficial.

Uma das principais vantagens da aplicação das técnicas geofísicas em relação aos métodos tradicionais de investigação de subsuperfície, como as sondagens, é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor. Além disso, os levantamentos geofísicos propiciam a execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior

precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea (GREENHOUSE, 1996).

Os métodos geofísicos mais eficientes nos estudos ambientais são o método elétrico da Eletroresistividade e os métodos eletromagnéticos Slingram e GPR (FACHIN et al., 2006).

O elevado contraste entre as propriedades elétricas do meio geológico e os tipos de contaminantes frequentemente encontrados neste meio, essencialmente constituídos por compostos orgânicos e inorgânicos (MOREIRA et al., 2006) que explicam o crescente uso desses métodos.

### 3.2 GEOFÍSICA FORENSE

Há no Brasil, notícias relativamente esparsas da aplicação da Geofísica na localização de alvos de interesse forense.

As primeiras aplicações de técnicas de Geofísica Forense datam do final da década de 1980 e início da década de 1990 (PIRES, 2001).

Dourado et al. (2003), por exemplo, estudaram com o GPR a resposta de valas escavadas e depois preenchidas onde seriam liberados contaminantes por meio de canalizações dispostas a diferentes profundidades. A resposta das valas é útil para investigações da Geofísica Forense e, especialmente, da Geofísica aplicada à Arqueologia e da Geofísica Antropológica, quando é realizada a prospecção indireta do alvo, porque sua resposta geofísica é demasiadamente fraca ou inexistente, em virtude da falta de contraste de suas propriedades físicas e o meio, mas existe alguma feição a ele associada (no caso a vala preenchida por material inconsolidado).

Os primeiros trabalhos acadêmicos foram realizados por Silva (2008), Costa (2009) e Nascimento (2009) no campo de testes controlados forense ambiental (FORAMB), no cemitério do Tapanã.

Silva (2008) descreve o FORAMB, utilizado nos trabalhos de Costa (op. cit.) e Nascimento (op. cit.).

Costa (2009.), em seu trabalho de conclusão do Curso de Graduação em Geofísica, estudou os alvos do FORAMB com Métodos Elétricos (Potencial Espontâneo e

Eletrorresistividade) e Radiométrico (Cintilometria). Esses métodos geofísicos usam instrumental de preço muito inferior e mais fácil de operar do que o GPR que, com frequência, existe em várias instituições; além disso, a manipulação dos dados obtidos é também mais simples do que a manipulação feita com os dados de GPR. O autor considerou os dados de Eletrorresistividade os mais satisfatórios.

Nascimento (2009), por sua vez, em sua dissertação de mestrado, mostra dados para os alvos do FORAMB obtidos com os métodos eletromagnéticos GPR e Slingram, enfatizando a qualidade superior dos dados GPR.

### 3.3 CAMPOS DE TESTES

Os campos de testes controlados de geofísica permitem conhecer a resposta dos métodos geofísicos a diferentes tipos de alvos.

Existem vários campos de testes controlados no mundo (Tabela 3.1). No Brasil há três sítios: o Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR) do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), o Campo de Testes da Faculdade de Geofísica (FAGEOF) do Instituto de Geociências (IG) da UFPA dentro da área do campus da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e o Campo de Testes Controlados para Geofísica Forense, Ambiental e de Resgate (FORAMB), também da FAGEOF/UFPA (Figura 3.1 e Figura 3.2).

Tabela 3.1 - Campos de testes no Brasil e no mundo.

<b>Local</b>	<b>Responsável</b>
Brasil, Campus da UFRA	Universidade Federal do Pará
Brasil, Cemitério do Tapanã	Universidade Federal do Pará
Brasil, Campus da USP	Universidade de São Paulo
Espanha, Escola Politécnica	Universidade de Extremadura
França, Área de testes geotécnicos e geofísicos	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
EUA, Área de Testes Arqueológicos Controlada	Laboratório de Pesquisa de Engenharia de Construção da Companhia Armada de Engenheiros dos Estados Unidos
Inglaterra, Universidade de Leicester	Universidade de Leicester, Inglaterra
EUA, Universidade de Nevada	Universidade de Nevada, EUA
EUA, Universidade de Nova Iorque	Universidade de Nova Iorque, EUA
EUA, Universidade de Stanford	Universidade de Stanford, EUA
Alemanha, Universidade Johann Wolfgang Goethe	Johann Wolfgang Goethe Universität

Fonte: Borges (2007); Costa (2009)



Figura 3.1 – Campo de Testes FORAMB. Levantamento GPR.

Fonte: Nascimento (2009)



Figura 3.2 - Campo de Testes FORAMB. Levantamento IP e Eletroresistividade.

O SCGR ocupa uma área específica de 1500 m<sup>2</sup> (50 m x 30 m) e possuem diferentes alvos de interesse geotécnico e ambiental, com diferentes dimensões e profundidades, dispostos em sete linhas de 30 m (PORSANI et al., 2004 e 2006 ; BORGES, 2007).

O Campo de Testes da UFPA na UFRA é constituído por 6 linhas de medidas espaçadas de 4 m, tendo 40 m de comprimento e está em fase de implementação (LUIZ et al., 2007).

Finalmente, o FORAMB ocupa uma área de 60 m<sup>2</sup> (15 m x 4 m) do cemitério do Tapanã com autorização da Prefeitura Municipal de Belém, por meio da Secretaria Municipal de Administração (SEMAD), e apoio do Instituto Médico Legal Renato Chaves (IML) desde 2007. Como no FORAMB foram realizados os testes com o método IP, esse campo de testes é a seguir detalhado.

### 3.3.1 FORAMB

A área do FORAMB foi selecionada por meio do GPR no dia 13/07/2007 em uma zona com poucos ruídos culturais e geológicos (NASCIMENTO, 2009). Ela é próxima aos ossuários, fora da zona de sepultamento do cemitério para não sofrer influência dos corpos já enterrados.

Há três alvos no FORAMB: um corpo humano, um túnel e uma caixa de armas, atravessados transversalmente por um perfil de 13 m (Figura 3.3 ).

O primeiro alvo enterrado trata-se de um cadáver humano do sexo masculino, com aproximadamente 55 kg e 1,60 m de altura, já com menos líquido em sua constituição por conta da autópsia e congelamento (Figura 3.4). O cadáver estava envolto em uma lona plástica negra aberta numa extremidade; ele foi enterrado a uma profundidade de 0,8 m, em uma cova de 0,6 m de largura, entre as posições 3,8 e 4,4 m do perfil.

O segundo alvo trata-se de um caixote vazio de madeira usado para simular um túnel, com dimensões de 0,5 m de largura, 0,5 m de altura e 2,2 m de comprimento (Figura 3.5 ). A base do caixão foi enterrada a 1 m de profundidade entre as posições 7,5 m e 8,0 m no perfil.

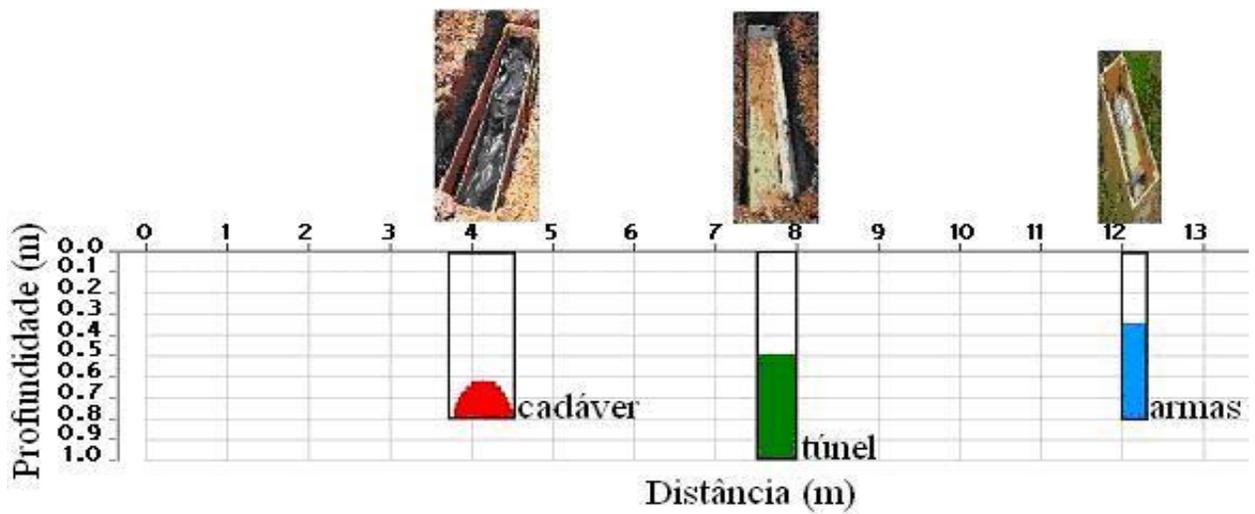


Figura 3.3 - Perfil esquemático e respectivos alvos enterrados no FORAMB.

Fonte: Costa (2009)



Figura 3.4 – Foto do cadáver humano, envolto em uma lona plástica, enterrado no FORAMB, Belém/Pará.

Finalmente, o terceiro alvo trata-se de uma caixa de madeira, cujas dimensões são: 0,8 m de comprimento, 0,3 m largura e 0,45 m altura, com metais com peso e volume equivalentes aos de uma granada, uma pistola e um fuzil, separados em três níveis por papelão (Figura 3.6). A base da caixa enterrada foi a 0,8 m, entre as posições 11,9 m e 12,2 m.

A construção de áreas de testes em geofísica dentro de cemitérios possibilita:

- i. o estudo das respostas geofísicas de cadáveres humanos, em vez de cadáveres de animais (em especial, porcos), como usado na maioria dos estudos de Geofísica Forense, e
- ii. realizar esse estudo com o decorrer do tempo.



Figura 3.5 – Caixa simulando túnel no campo de teste FORAMB.



Figura 3.6 – Caixa com metais simulando armas enterradas no campo de teste FORAMB.

Fonte: Nascimento (2009)

## 4 ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O cemitério do Tapanã está localizado no km 5 da Rodovia do Tapanã, entre as rodovias Augusto Montenegro e Arthur Bernardes, no bairro do Tapanã, na região metropolitana de Belém, Estado do Pará (Figura 4.1).

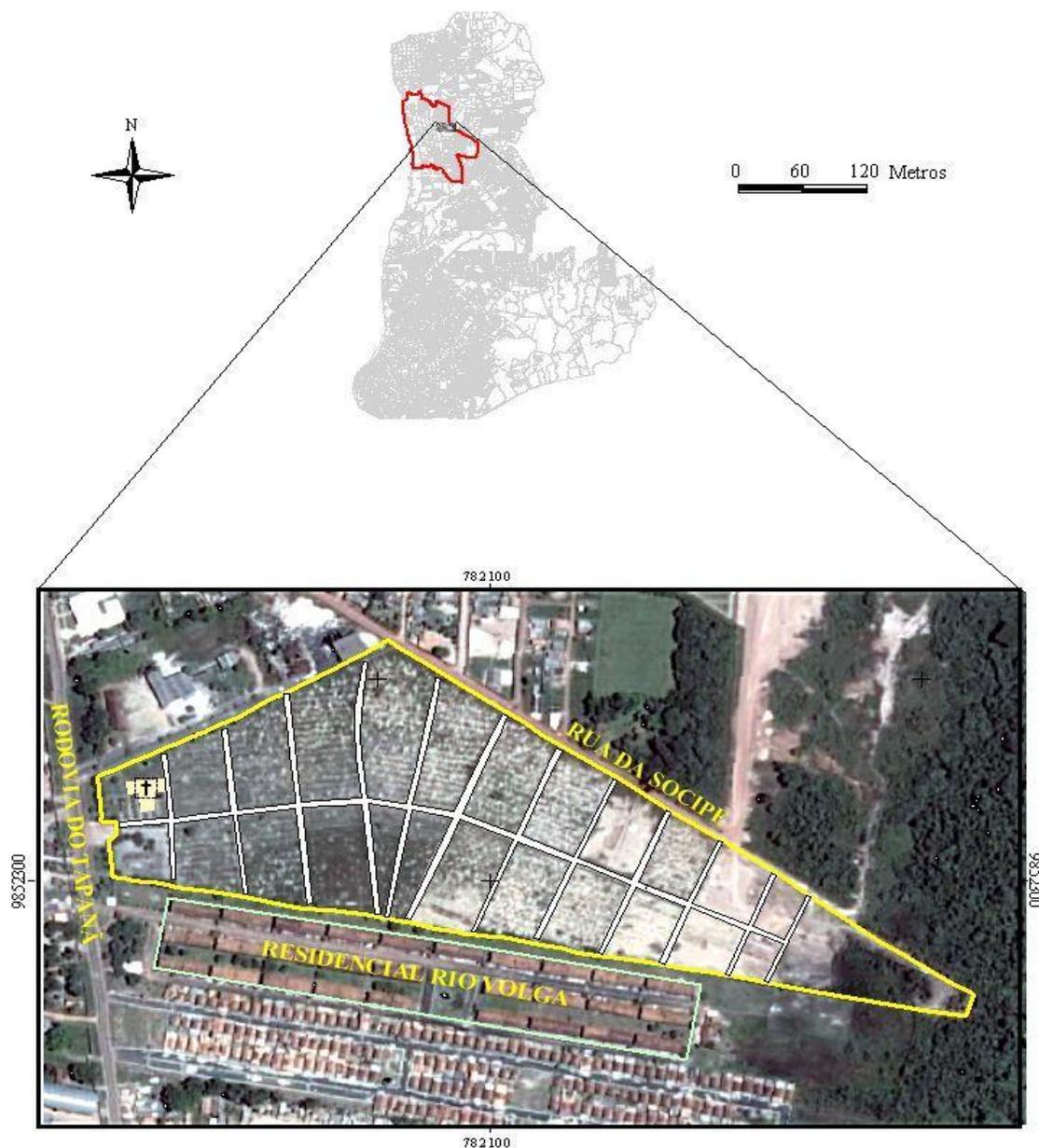


Figura 4.1 - Mapa de localização do cemitério do Tapanã.

Fonte: Dados vetoriais CODEM (1998)

## 4.2 ASPECTOS FÍSICOS

### 4.2.1 Relevo

No município de Belém, a topografia apresenta-se pouco variável e baixa, atingindo a altitude máxima 25 m na ilha de Mosqueiro (PARÁ, 2008). O relevo do cemitério do Tapanã apresenta um desnível topográfico considerável para a região: 16 m a montante que cai para 2 m a jusante (Figura 4.2), segundo dados de curvas de nível fornecidos pela Companhia de Desenvolvimento da Área Metropolitana de Belém (CODEM).

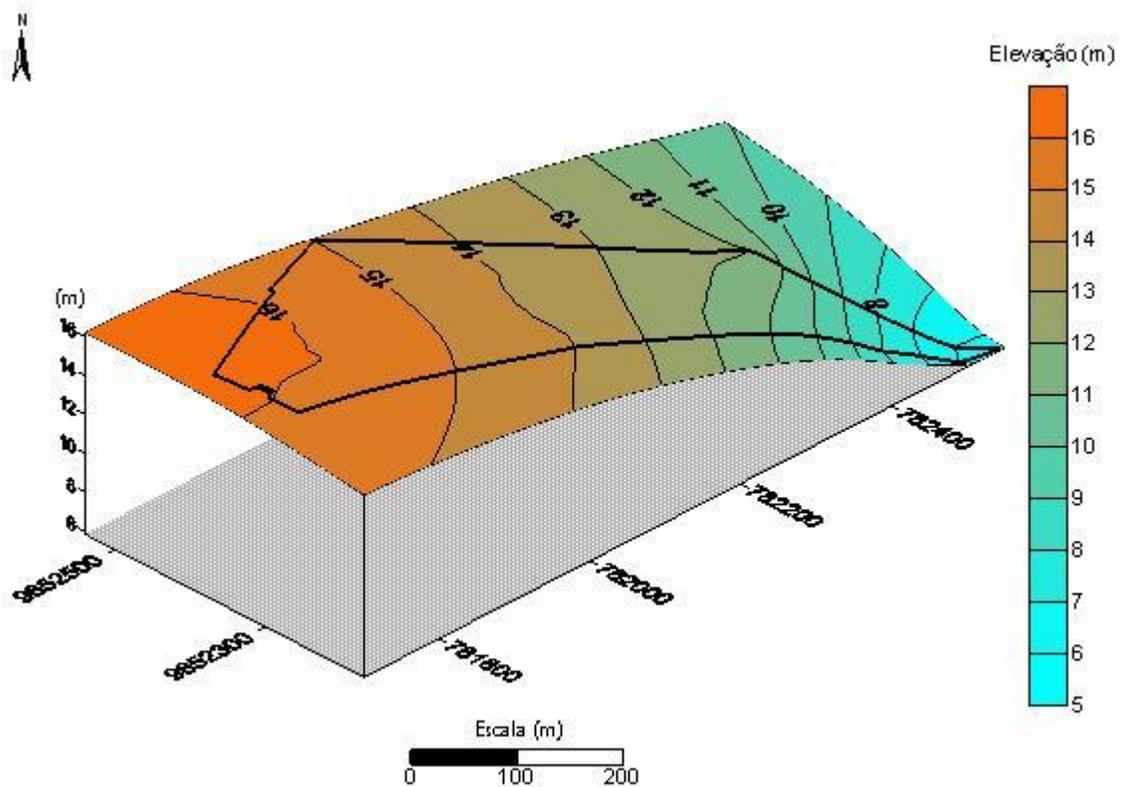


Figura 4.2- Modelo topográfico do cemitério do Tapanã.

#### 4.2.2 Clima

No município de Belém, o clima é quente úmido. A precipitação anual média fica em torno de 2,834 mm/ano, com maior frequência de chuvas no período de Janeiro a Junho, e estação seca de Julho a Dezembro. A temperatura média é de 26° C, com máxima de 34° C e mínima de 18° C e a umidade relativa do ar é de 85% (VIEIRA, 1987; SANTOS, 1987).

A Figura 4.3 mostra a pluviosidade média para 1, 2, 5, 10, 15 e 20 dias antes das datas 30/08/2007, 16/11/2007, 14/12/2007 e 29/12/2008 de aquisição dos dados de IP e resistividade no FORAMB que serão mostrados adiante (INMET, 2007).

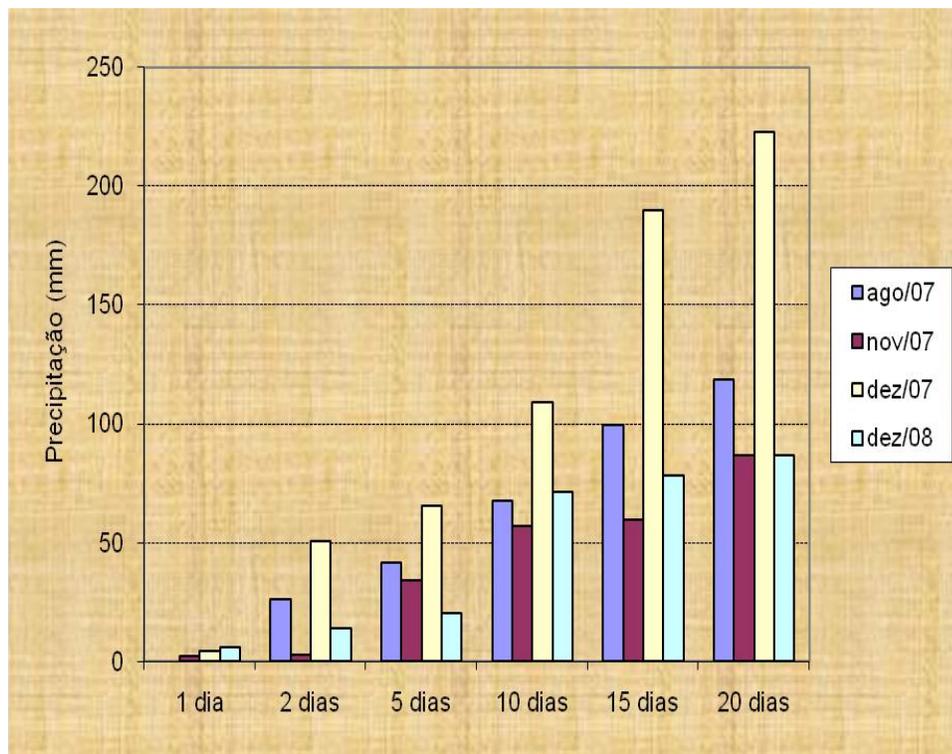


Figura 4.3 - Representação temporal em 1, 2, 5, 10, 15 e 20 dias da precipitação na área de estudo.

#### 4.2.3 **Hidrografia**

A rede hidrográfica do município de Belém é formada por furos, baías, rios e igarapés, que drenam inclusive o centro urbano de Belém.

Os elementos hídricos de maior significado para o município são as baías do Guajará, Marajó, Sol e Santo Antônio, e os rios Guamá, Maguari, Murubira, Pratiqara e Aurá, além de inúmeros igarapés que deságuam nas drenagens principais formando uma drenagem bem distribuída do tipo dendrítica (MERCÊS, 1997).

A baía de Guajará, parte do estuário da foz do rio Amazonas, tem forma alongada e estreita, apresentando continuidade na baía de Marajó a Norte. Situa-se a Oeste da cidade de Belém e recebe as águas dos rios Pará, Acará e Guamá. Suas águas são barrentas e, no período de baixa pluviosidade na região, ficam salobras devido às influências das águas oceânicas (PINHEIRO, 1987).

Na área de estudo, segundo dados vetoriais da CODEM, à jusante do cemitério do Tapanã (porção leste) passa um igarapé denominado de Bacuri. (Figura 4.4).

#### 4.2.4 **Geologia**

Os terrenos do município de Belém são constituídos de rochas sedimentares, sobrejacendo a um substrato granito-gnáissico (IDESP, 1980).

Esse pacote sedimentar pertence à bacia sedimentar da foz do Amazonas, que possui cerca de 700 m de espessura. Nele encontram-se depósitos sedimentares do Terciário, representado pelas formações Pirabas e Barreiras, e do Quaternário, sedimentos Pós-Barreiras e Recentes (FARIAS et al., 1992).

A Formação Pirabas é constituída por calcários diversificados intercalados com arenitos calcíferos, argilas negras e folhelhos rítmicos. Apresenta um variado conteúdo macro e microfossífero animal e vegetais piritizados (ROSSETI et al., 1989).

A Formação Barreiras compreende sedimentos continentais, argilosos, arenosos e ocasionalmente conglomeráticos e ferruginizados (Grês do Pará). Apresenta estratificações cruzadas, conteúdo fossilífero representado por vegetais e fósseis animais. A camada argilo-are-

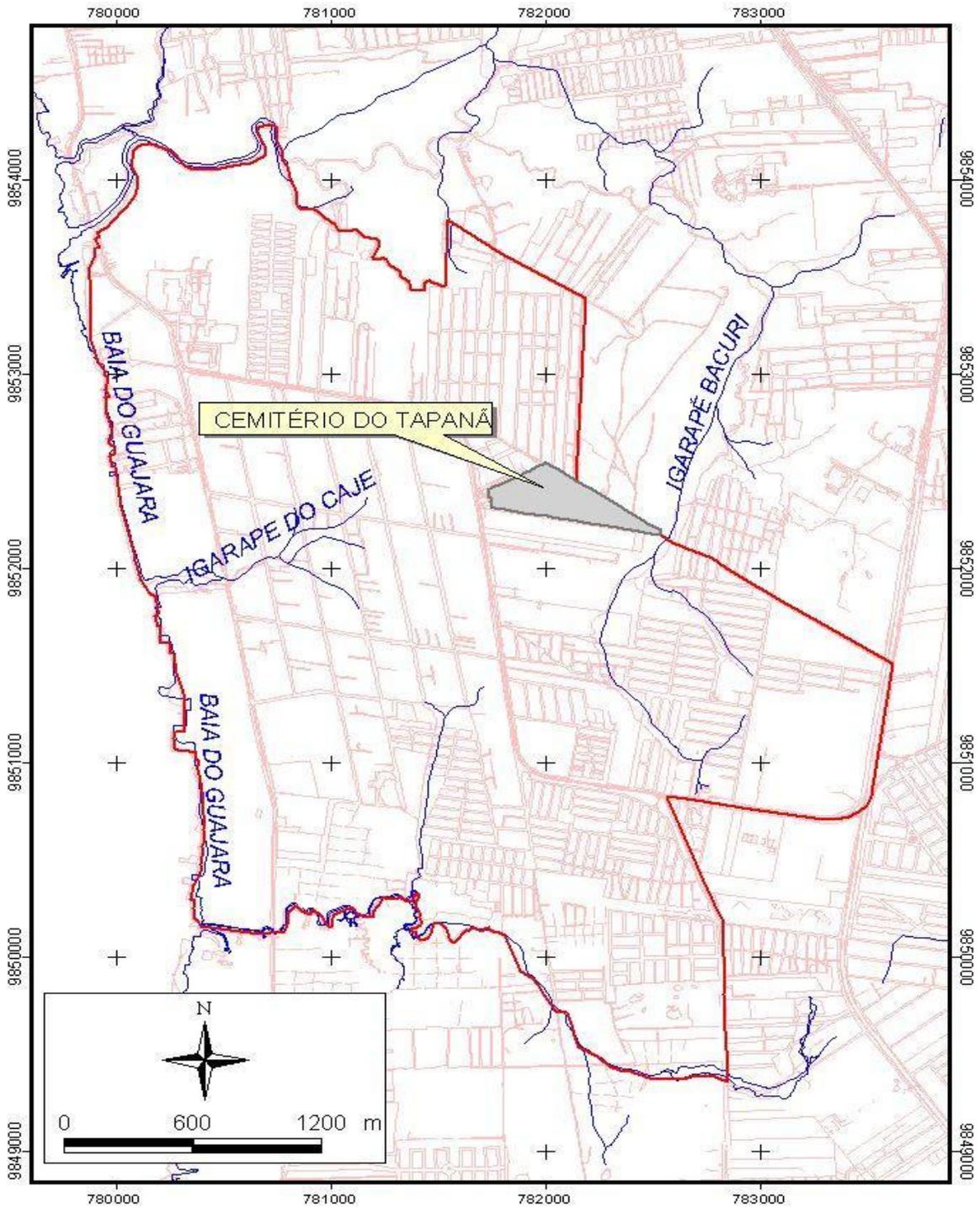


Figura 4.4 - Igarapé Bacuri localizado à jusante do cemitério do Tapanã.

Fonte: Dados vetoriais CODEM (1998)

nosa é constituída predominantemente de argila de coloração esbranquiçada com manchas avermelhadas, arroxeadas e/ou amareladas, resultantes do intemperismo (IGREJA et al., 1990).

O Pós-Barreiras é constituído por sedimentos arenosos, em parte argilo-arenosos ou argilo-conglomeráticos, apresentado coloração amarelada típica, bastante homogênea, e estrutura maciça (FARIAS et al., 1992).

Os Sedimentos Recentes consistem de areias e argilas com silte associado. Estes depósitos têm coloração marrom e são compostos de areias de granulação fina a média, com intercalações de argilas. As argilas são cinzas, marrons e às vezes pretas, com restos de vegetais. Estes conjuntos de sedimentos ocorrem nas áreas de baixadas inundáveis da faixa litorânea, praias e nas margens dos rios e igarapés do município (FARIAS et al., op. cit.).

A Figura 4.5 mostra a geologia da área do cemitério do Tapanã.

Período	Unidade	Prof (m)	Representação	Descrição
QUATERNÁRIO	Sedimentos Pós-Barreiras	0,30		Solo
		2,90		Sedimentos areno - argilosos, de coloração amarelo ferruginosa, granulometria variando de fina a média.
TERCIÁRIO	Sedimentos do Grupo Barreiras	4,00		Sedimentos areno-argilosos, de coloração amarelo ferruginosa, granulometria variando de fina a grossa, apresentando concreções ferruginosas de até 4 cm.
		5,20		Sedimentos argilo-arenosos de coloração cinza escura.
		7,50		Argilito laminado, de coloração avermelhada, com pequenas lentes areia.
				Areia grossa mal seccionada, com grãos subangulosos, gradando superiormente para um nível conglomerático. Corresponde a uma camada com água

Figura 4.5 - Litoestratigrafia do cemitério do Tapanã .

Fonte: Damasceno (2001)

## 5 MÉTODO GPR

O Método do Radar de Penetração no Solo ou, abreviadamente, GPR (Ground Penetrating Radar) emprega a radiação de ondas eletromagnéticas (EM) de frequência alta (normalmente entre 10 MHz a 2,5 GHz) a partir de uma antena transmissora colocada às proximidades da superfície do terreno. As ondas se propagam nos materiais da subsuperfície, sofrendo reflexão, refração e difração. As ondas que retornam à superfície são detectadas pela mesma antena transmissora ou por outra antena colocada próximo à antena transmissora, fornecendo informações sobre a subsuperfície (DANIELS, 1996).

A propagação do sinal EM depende da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais, as quais são principalmente dependentes do conteúdo de água presente no solo.

O método GPR foi desenvolvido na Alemanha em 1929. Os primeiros estudos foram de identificação e mapeamento de fissuras e espessuras de geleiras na Groenlândia (DANIELS op. Cit., 1996; DAVIS e ANNAN, 1989). Sua ampla utilização data da década de 80.

No Brasil, os primeiros estudos com o GPR datam da década de 1980 (ROOSEVELT, 1991). Atualmente, organizações, universidades e outras instituições vêm trabalhando na aplicação deste método para fins diversos, tais como: meio ambiente, geologia, geotecnia, arqueologia, planejamento urbano (detecção de adutora com vazamento, instalação de aterro sanitário e outros).

### 5.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os fundamentos físicos do método GPR encontram-se na teoria da propagação de ondas eletromagnéticas (DANIELS, 1996), descrita pelas equações de Maxwell:

$$\Delta \vec{D} = \rho, \quad (1.1)$$

$$\Delta \vec{B} = 0, \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad e \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1.4)$$

em que  $\rho$  é a densidade volumétrica de carga elétrica ( $C/m^3$ ),  $\vec{E}$  é a intensidade do campo elétrico (V/m),  $\vec{H}$  é a intensidade do campo magnético (A/m),  $\vec{D}$  é a densidade de fluxo elétrico ( $C/m^2$ ),  $\vec{B}$  é a densidade de fluxo magnético ( $Wb/m^2$  ou Tesla) e  $\vec{J}$  é a densidade de corrente elétrica ( $A/m^2$ ).

As equações de Maxwell, para serem resolvidas, dependem de informações sobre as propriedades elétricas dos materiais por onde atuam os campos elétricos e magnético, que são fornecidas pelas relações constitutivas da matéria.

A primeira relação constitutiva do meio trata-se da Lei de Ohm, que relaciona a densidade de corrente elétrica ( $\vec{J}$ ) e o campo elétrico ( $\vec{E}$ ):

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

em que  $\sigma$  é a condutividade elétrica, expressa em Siemens por metro (S/m).

A segunda relação constitutiva do meio relaciona o campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e a densidade de fluxo elétrico ( $\vec{D}$ ) por meio da permissividade dielétrica do material ( $\epsilon$ ):

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

Frequentemente, em estudos de GPR, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa, que corresponde à razão entre a permissividade do meio  $\epsilon$  e a permissividade do vácuo  $\epsilon_0$  (igual a  $8,85419 \times 10^{-12}$  F/m):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}. \quad (1.7)$$

A terceira relação constitutiva do meio relaciona diretamente o campo magnético ( $\vec{H}$ ) com o campo indução magnética ( $\vec{B}$ ):

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

sendo  $\mu$  a permeabilidade magnética do material, geralmente assumida igual à permeabilidade magnética do vácuo  $\mu_0$  ( $\mu = \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$  H/m).

Partindo-se das equações de Maxwell e das relações constitutivas, obtém-se a equação de onda para o campo elétrico, expressa em:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad (1.9)$$

em que  $k$ , definido como número de onda, é o termo que agrupa as propriedades das rochas (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética):

$$k^2 = w^2 \mu \epsilon - iw \mu \sigma, \quad (1.10)$$

sendo  $w$  igual a frequência angular (com  $w = 2\pi f$ , em que  $f$  é a frequência).

Para altas frequências, o primeiro termo da equação 5.10 torna-se significativo e não pode ser desprezado como nos outros métodos eletromagnéticos de baixa frequência.

Para um meio homogêneo e uniforme, assumindo-se que o campo elétrico varia harmonicamente, a solução da equação de onda 5.9 é dada por:

$$E = E_0 e^{i(\alpha x - \omega t)} e^{-\beta z}, \quad (1.11)$$

em que  $E_0$  é o máximo valor da amplitude da onda,  $z$  é a profundidade e  $\alpha$  e  $\beta$  são os termos que reúnem as propriedades eletromagnéticas do meio (WARD; HOHMANN, 1987), dados por:

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon}{2} \left[ (1 + tg^2 \delta)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \text{ e} \quad (1.12)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon}{2} \left[ (1 + tg^2 \delta)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (1.13)$$

em que  $tg \delta = \sigma / \omega \epsilon$  é denominado de fator de perda.

A primeira exponencial da equação 5.11 descreve a propagação harmônica da onda (daí  $\alpha$  ser chamada de constante de propagação ou fase), enquanto a segunda exponencial é responsável pela sua atenuação (por isso,  $\beta$  é conhecida como constante de atenuação) (DANIELS, 1996).

A velocidade de propagação  $v$  da onda eletromagnética no meio é dada por (DANIELS, *op. cit.*):

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma / \omega \epsilon)^2}}{2}}}, \quad (1.14)$$

em que  $c_0$  é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) e  $\mu_r = \mu / \mu_0$ . Como o GPR somente produz bons resultados em meios com valores baixos de condutividade e trabalha com frequências muito elevadas, o fator de perda é próximo de zero. Assumindo-se que o meio não é magnético ( $\mu_r = 1$ ), a expressão da velocidade da onda eletromagnética se reduz a:

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (1.15)$$

Quando a onda eletromagnética se propaga no meio e encontra discontinuidades nas propriedades eletromagnéticas, ela sofre sucessivas reflexões e refrações. A quantidade de energia eletromagnética refletida é proporcional à magnitude das mudanças eletromagnéticas do meio, sendo controlada pelo coeficiente de reflexão  $CR$ :

$$CR = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (1.16)$$

sendo

$$Z = \frac{\sqrt{i\omega\mu}}{\sqrt{\sigma + i\omega\epsilon}}. \quad (1.17)$$

Nas aplicações com GPR, que emprega frequências elevada, a equação 5.17 pode ser simplificada como segue:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (1.18)$$

e o coeficiente de reflexão passa a ser expresso da seguinte maneira:

$$CR = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}. \quad (1.19)$$

A profundidade de investigação e a resolução do GPR dependem da frequência da antena. Quanto maior a frequência, menor a profundidade de investigação e melhor a resolução da imagem. A Tabela 5.1 mostra para diferentes áreas de interesse de aplicação do GPR, a frequência comumente usada e a profundidade estimada de penetração.

Tabela 5.1 - Frequência associada a profundidade.

Área de Interesse	Frequência Central (MHz)	Profundidade Estimada de Penetração (m)
Estruturas de Concreto, Estradas e Pontes	1500	0,5
Concreto, Arqueologia e Solos Superficiais	900	1
Geologia, Arqueologia e Ambiental	400	4
Geologia e Meio Ambiente	200	8
Geologia e Meio Ambiente	100	20

Fonte: Adaptada da GSSI (2003)

A Tabela 5.2 reúne materiais com diferentes propriedades mais a velocidade de propagação da onda EM e sua atenuação.

Tabela 5.2 - Permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ), condutividade elétrica ( $\sigma$ ), velocidade ( $v$ ) e atenuação ( $\alpha$ ) típicas de alguns materiais.

Material	$\epsilon_r$	$\sigma$ (mS/m)	$v$ (m/ns)	$\alpha$ (dB.m)
Ar	1	0	0,30	0
Água destilada	80	0,01	0,033	0,002
Água fresca	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3000	0,01	1000
Areia seca	3-5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1	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
Siltito	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

Fonte: Davis (1989); Annan (1989)

Segundo Davis e Annan (1989), a velocidade do sinal do GPR é praticamente constante entre as faixas de operação de 10 a 1000 MHz para condutividades inferiores a 100 mS/m, entretanto, para frequências acima de 1000 MHz, a velocidade aumenta devido ao efeito de relaxação da molécula de água, como mostra a Figura 5.1 .

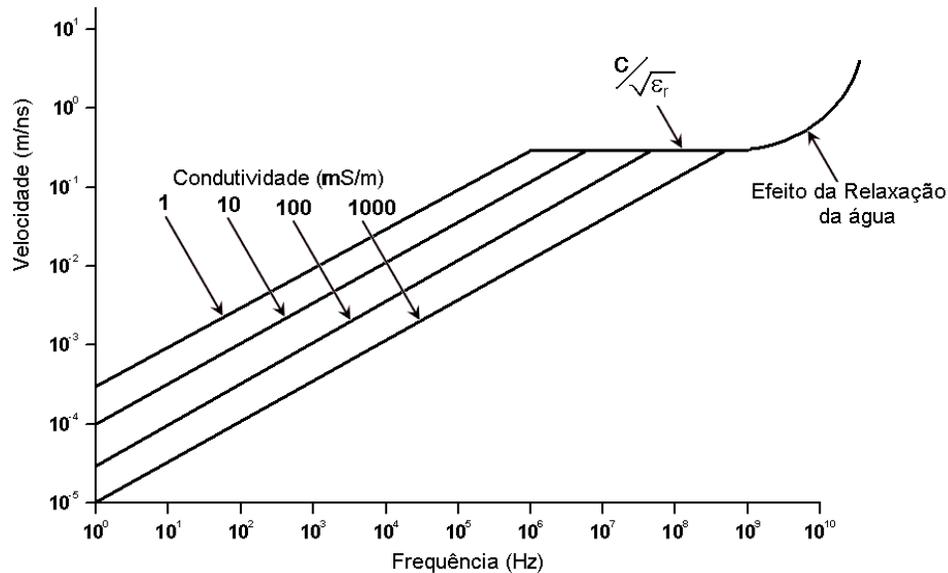


Figura 5.1 - Relação entre a velocidade e frequência para diferentes condutividades.

Fonte: adaptado de Davis (1989); Annan (1989)

## 5.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

### 5.2.1 Arranjos

O GPR é caracterizado por um gerador de sinal e antenas transmissora e receptora. As antenas podem ser usadas no que se designa por modos monoestático e biestático. No modo monoestático, a antena é utilizada tanto para emissão como para recepção, conforme mostra a Figura 5.2a. No modo bi-estático, são usadas duas antenas separadas, uma para emissão e a outra para recepção, como aparece na Figura 5.2b.

A aquisição dos dados a partir dos levantamentos feitos no terreno com o GPR pode ser, basicamente, realizada com três tipos de arranjos: afastamento comum, ponto médio comum (*common mid point*, CMP) e reflexão e refração de grande ângulo (*wide angle reflection and refraction*, WARR).

Com o afastamento comum, as antenas transmissoras e receptoras mantêm uma distância fixa durante o levantamento (Figura 5.3a). Esse tipo de arranjo é adequado para verificar mudanças laterais na subsuperfície.

Na aquisição de dados com o arranjo CMP, as antenas transmissora e receptora são movidas em direções opostas, equidistantes, afastando-se em relação a um ponto fixo central entre ambas (Figura 5.3b). O CMP é usado para estimar a velocidade da onda na subsuperfície.

Outra maneira de estimar a velocidade é através do arranjo WARR. O levantamento é feito com antenas biestáticas, mantendo fixa a antena transmissora (arranjo *WARR de fonte comum*), ou a antena receptora (*WARR de receptor comum*), como mostram as Figura 5.3c e Figura 5.3d.

Nos levantamentos com antenas biestáticas, a identificação dos diversos tipos de ondas que se propagam da antena transmissora para a receptora diretamente através da superfície, do ar e do solo e após se refratarem e refletirem nas interfaces dos meios com diferentes propriedades elétricas é facilitado.

### 5.2.2 Campanha de Campo

A aquisição dos dados de GPR foi realizada ao longo de cinco perfis mostrados em amarelo na Figura 5.4.

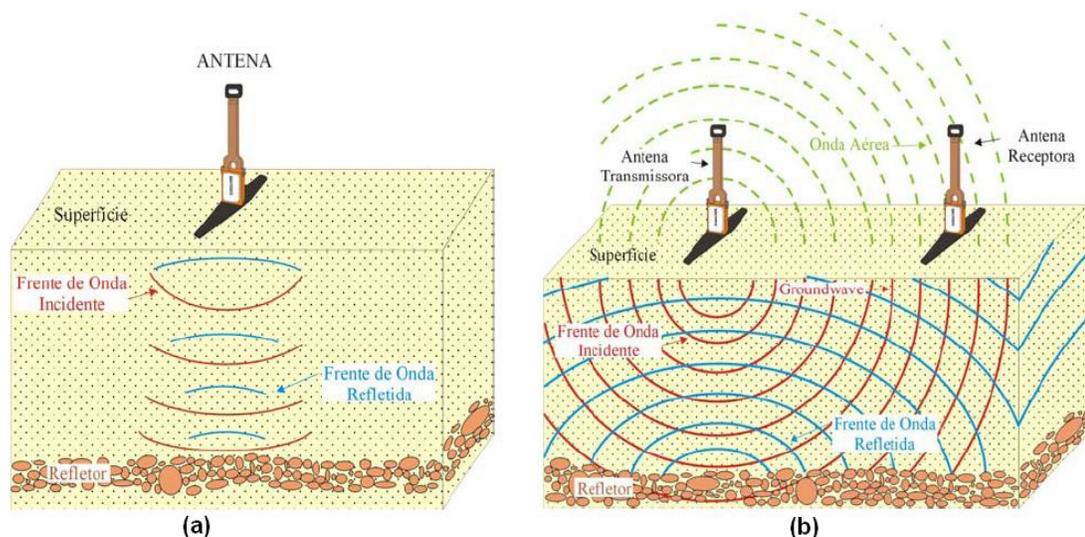


Figura 5.2 - Antenas (a) monoestática, e (b) biestática.

Fonte: Borges (2002)

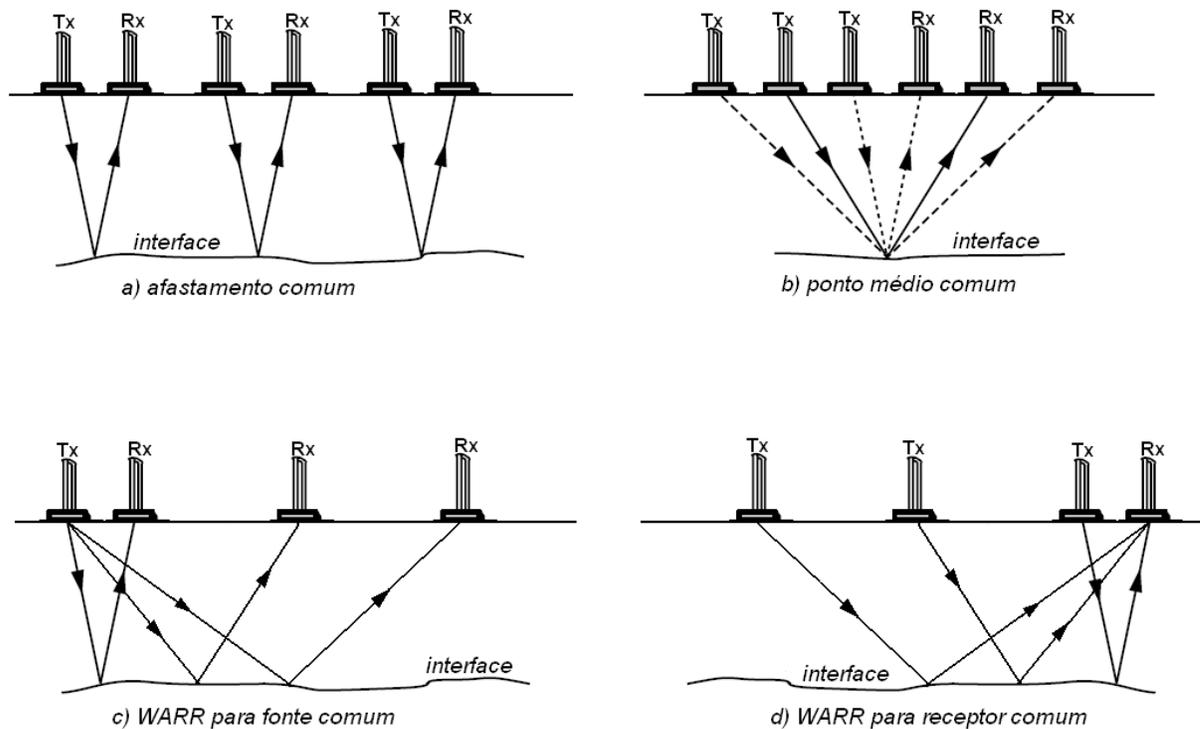


Figura 5.3 - Arranjos usados nos levantamentos GPR.

Fonte: adaptada de Milson (2003)

O perfil 1 corta a porção central do cemitério do Tapanã, passando pela sua passarela principal de cimento de 650 m (Figura 5.5). Ele foi levantado de Oeste para Leste no dia 05/03/2009. Um perfil maior, de 700 m, também levantado de Oeste para Leste, o perfil 5, passa pelo lado de fora da extremidade Sul do cemitério, em área sem calçamento do condomínio residencial Rio Volga (Figura 5.6); ele foi levantado no dia 05/03/2009. Finalmente, outros 3 perfis foram levantado transversalmente à passarela principal de Sul para Norte no dia 27/03/2009; são eles o perfil 2 de 180 m (quarta passarela do cemitério), o perfil 3 de 170 m (oitava passarela) e o perfil 5 de 90 m (décima segunda passarela), todos sobre calçamento.

A janela de tempo usada foi de 250 ns, atingindo a profundidade de aproximadamente 9 m.

Os perfis de GPR foram executados com o sistema SIR-3000 da GSSI, com antena de 200 MHz. As medidas foram tomadas com afastamento comum no modo tempo, com posicionamento controlado pela inserção de marcas no registro a intervalo de 50 em 50 m.

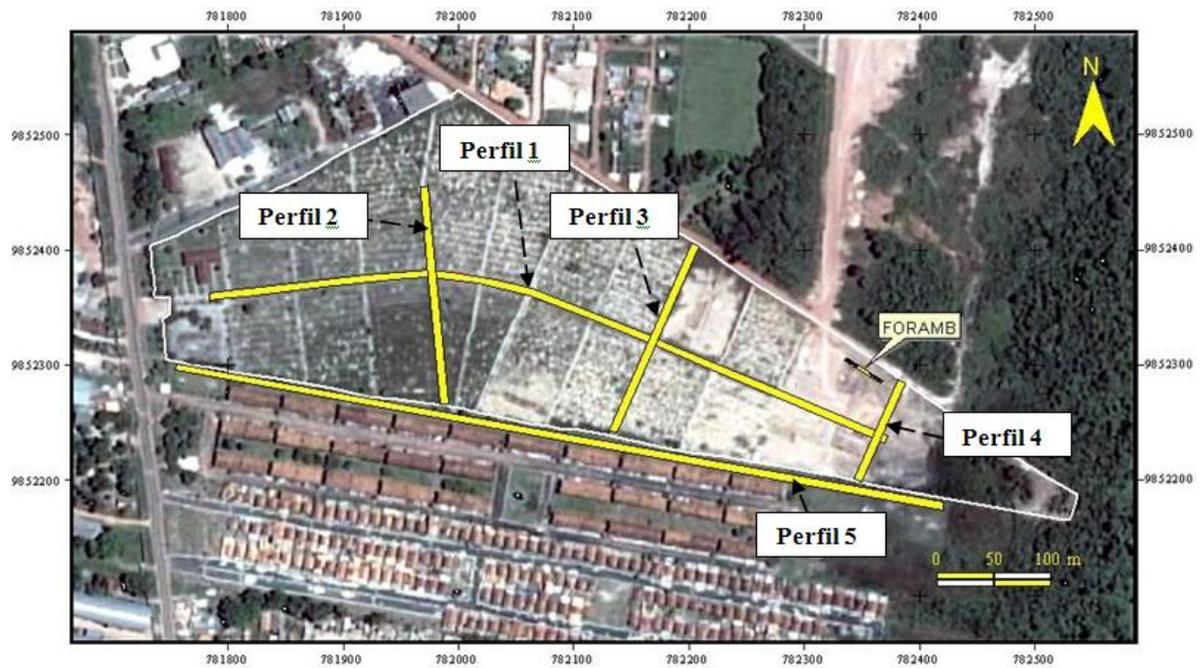


Figura 5.4 - Localização dos perfis GPR no cemitério do Tapanã e do perfil no FORAMB.



Figura 5.5 – Aquisição de dados de GPR no cemitério do Tapanã, perfil na passarela principal (cimento).



Figura 5.6 - Aquisição de dados de GPR no cemitério do Tapanã, perfil no Residencial Rio Volga (grama).

### 5.3 PROCESSAMENTO

Ao se propagarem na subsuperfície, as ondas eletromagnéticas emitidas pelo GPR interagem com o meio sofrendo perdas causadas por espalhamento e atenuação. Essas perdas influenciam na qualidade do sinal registrado, mascarando a forma das estruturas e objetos no subsolo. Além disso, outros efeitos podem surgir no registro como ondas aéreas e diretas. Portanto, os dados medidos precisam ser processados para facilitar a interpretação dos materiais.

Vários são os métodos de se fazer o processamento, entretanto muitos deles seguem um padrão básico, que consiste nas seguintes etapas:

a) Pré-processamento – são exemplos a interpolação de marcas e o ajuste do tempo zero ou correção estática, isto é, eliminação do registro das ondas diretas fazendo com que o zero do perfil coincida com a superfície do terreno;

- b) Aplicação de ganho – utilizado para realçar os refletores e os difratores de baixa amplitude que estão em profundidades maiores e dependendo do meio podem aparecer atenuados por causa da perda de amplitude do sinal da onda eletromagnética;
- c) Filtragem – redução ou eliminação dos ruídos; existem diversos filtros que podem ser aplicados no processamento de um radargrama dependendo do tipo de problema que está sendo investigado ou estruturas que precisam ser ressaltadas;
- d) Conversão do tempo em profundidade – transformação dos tempos de retorno das ondas, para obtenção da profundidade dos objetos investigados (exige calcular a velocidade de propagação do meio, o que pode ser feito por meio das hipérbolas de difração presentes no radargrama, além de CMP, etc.); e, finalmente,
- e) Correção Topográfica – correção do desnível topográfico.

Neste trabalho, o processamento dos dados de GPR foi realizado com o programa Reflex-Win 4.2 da Sandmeier Software. A seguinte sequência de processamento foi utilizada: interpolação das marcas de posicionamento, correção estática, ganho, aplicação do filtro 1D (DEWOW), aplicação de filtro passa banda, conversão do tempo em profundidade e correção topográfica.

#### 5.4 INTERPRETACÃO

O levantamento GPR teve como objetivo principal mapear o nível hidrostático do cemitério do Tapanã. Para melhor descrição dos alvos visualizados em subsuperfície, o perfil 1 de 650 m foi dividido em três perfis menores e o perfil 5 de 700 m, em quatro perfis menores: Os demais perfis não foram divididos.

Os resultados são mostrados da seguinte maneira: radargrama obtido com dados brutos submetidos apenas à correção estática, radargrama processado e radargrama interpretado. O desnível topográfico pode ser visto nos radargramas processados e interpretados. Para os perfis menores de detalhamento dos perfis 1 e 5 são apresentados somente os radargramas interpretados.

Primeiramente, são interpretados os radargramas de dentro do cemitério do Tapanã, posteriormente, o radargrama obtido externamente ao cemitério, dentro do residencial Rio Volga. A velocidade utilizada em todos os radargramas foi de 0,075 m/ns (NASCIMENTO, 2009).

#### 5.4.1 **Perfil 1**

Os radargramas obtidos no perfil 1, ao longo da passarela central de cimento do cemitério, já mostrado anteriormente na Figura 5.5. No aspecto geral, observam-se macrofeições horizontais representadas, provavelmente, pela ocorrência descontínua de Grês do Pará e um refletor horizontal, também descontínuo, sugestivo do inferido nível hidrostático (Figura 5.7). O detalhamento do radargrama interpretado é apresentado na descrição a seguir.

##### **Perfil 1a**

O radargrama obtido sobre o perfil 1a, com comprimento de 0 a 200 m do perfil original 1, é apresentado na Figura 5.8a.

Entre cerca de 0,8 a 2 m, aparecem zonas descontínuas onde o sinal é mais forte, que alternam com zonas onde o sinal aparece mais atenuado. As zonas descontínuas podem ser interpretadas como um horizonte ferruginoso (plintito). Essa laterita alternaria com horizonte argiloso.

Abaixo disso, a ocorrência de argila atenuando o sinal dá lugar, localmente, ao sinal forte provavelmente de Grês do Pará, entre 3 a 4 m de profundidade.

##### **Perfil 1b**

Na Figura 5.8b é mostrado em detalhes o radargrama obtido sobre o perfil 1b de 200 m comprimento.

O radargrama evidencia também a estratificação subsuperficial provavelmente relacionada ao piso do cemitério e estruturas acamadas mais rasas bem como a alternância entre prováveis laterita e argila, que são feições sem interesse para o presente trabalho. De um modo geral, predomina argila.

Uma zona marcada por refletores entre 320 e 370 m, a profundidade de 2 a 2,8 m, marca, provavelmente, o topo de Grês do Pará. Sotoposto a essa camada, observa-se um refletor horizontal, provável nível hidrostático do local, a uma profundidade de aproximadamente 5 m.

### **Perfil 1c**

O radargrama obtido sobre o perfil 1c, com extensão de 250 m, é encontrado na (Figura 5.8c). No radargrama destaca-se a presença de refletores fortes entre a distância de cerca de 430 e 550 m do perfil, a uma profundidade que varia de 1,2 a 2,6 m. A superfície irregular do refletor e a sua variação na espessura combinam com o modo de ocorrência da Grês do Pará. Sotoposto a essa camada, a cerca de 3,4 m de profundidade, aparece um refletor horizontal, sugestivo do nível hidrostático.

#### **5.4.2 Perfil 2**

O radargrama obtido sobre o perfil 2, com 180 m de comprimento, na porção mais a oeste do cemitério, são apresentados na Figura 5.9.

No radargrama interpretado aparecem marcadas as feições principais: refletores de superfície e espessura irregular, descontínuo, e refletor horizontal sotoposto ao anterior. O primeiro pode ser associado ao topo da camada de grês do Pará, estando localizada entre 3 e 4 m de profundidade, e o segundo, ao nível hidrostático do cemitério que estaria entre 4 e 5 m (Figura 5.9c).

#### **5.4.3 Perfil 3**

A Figura 5.10 reúne o radargrama obtidos sobre o perfil 3, com extensão de 160 m, na porção central do cemitério.

Os resultados evidenciam um zona com alta reflexão do sinal entre cerca de 94 e 130 m, provavelmente devido à reverberação do sinal durante a aquisição de dados, provocada pela superfície do calçamento no local se apresentar bastante irregular.

À profundidade entre 2 e 4 m aparece novamente o topo irregular e descontínuo da camada interpretada como Grês do Pará e sotoposto a essa camada, a cerca de 10 m do início do perfil, o refletor horizontal interpretado como o provável nível hidrostático (Figura 5.10c).

#### 5.4.4 Perfil 4

O radargrama obtidos sobre o perfil 4, com 90 m, na porção mais a leste do cemitério, são mostrados na Figura 5.11.

Os resultados evidenciam um zona com alta reflexão do sinal entre cerca de 36 e 51 m, provocada pela reverberação do sinal durante a aquisição de dados, ao ser levantada a antena em zona da passarela sem calçamento. As feições importantes, contudo, são refletores bem suaves, no início do perfil, e outros com sinal mais forte, no final do perfil.

Os refletores mais suaves podem ser relacionados, o mais raso com camadas subsuperficiais e o mais profundo ao Grês do Pará. Já os refletores mais fortes no final do perfil podem ser interpretados como blocos ou matacões (observados durante escavações).

#### 5.4.1 Perfil 5

Os radargramas obtidos no perfil 5 no residencial Rio Volga, são mostrados na Figura 5.12 O acentuado desnível topográfico foi incorporado nos radargramas processados e interpretados.

Nos resultados destacam-se zonas onde o sinal está bastante atenuado e faixas cujos refletores subhorizontais, irregulares e horizontais estão bem evidenciados, e provavelmente, devem ser interpretadas como ocorrência descontínua de Grês do Pará. Abaixo desta aparece o refletor horizontal, também descontínuo, do inferido nível hidrostático. O detalhamento do radargrama interpretado é apresentado na descrição seguir.

#### **Perfil 5a**

Na Figura 5.13a é mostrado em detalhe os primeiros 150 m do perfil 5 , caracterizado por apresentar refletores próximos a superfície entre cerca de 80 cm a 2 m de profundidade em praticamente todo o radargrama. Observações diretas no local sugerem que essas feições podem ser associadas à laterita ferruginosa.

Entre cerca de 2,6 a 3,6 m de profundidade, entre 0 e 20 m e, também, provavelmente,entre cerca de 110 e 140 m, encontra-se o topo refletor que vem sendo assumido de Grês do Pará.

O radargrama também marca de forma bem discreta um refletor horizontal compreendido a aproximadamente 7 m de profundidade, entre 10 e 15 m, sotoposto a Grês do Pará, sugestivo do nível hidrostático.

#### **Perfil 5b**

Na Figura 5.13b é apresentado em detalhe o perfil 5b com 190 m comprimento. Observa-se no radargrama a presença de dois refletores marcantes. O primeiro deles, a profundidade aproximada de 2,2 a 4,6 m, de acordo com observações locais e o padrão que apresenta (topo e espessuras irregulares) pode ser correlacionado à presença de Grês do Pará. O segundo refletor, sotoposto ao anterior, aproximadamente entre 5 e 5,4 m de profundidade, seria, provavelmente, a expressão do nível hidrostático.

#### **Perfil 5c**

Na Figura 5.13c apresenta em detalhe o perfil 5c de 200 m de extensão. Como no radargrama anterior, destaca-se o refletor que pode ser associado à Grês do Pará a profundidade de 1,2 a 2,6 m e, sotoposto a este, um segundo refletor que seria o provável nível hidrostático do cemitério, entre 3,4 a 3,8 m de profundidade.

#### **Perfil 5d**

Finalmente, no radargrama mostrado na Figura 5.13d, de 160 m de comprimento, foi assinalado o topo do refletor assumido como Grês do Pará, a uma profundidade que varia de 60 cm a 2 m, e o provável nível d' água, a aproximadamente 2 m de profundidade, subindo, ao final do perfil, para cerca de 1 m. Ao contrário dos outros radargramas, o nível freático não está abaixo da Grês do Pará, mas entra nessa rocha.

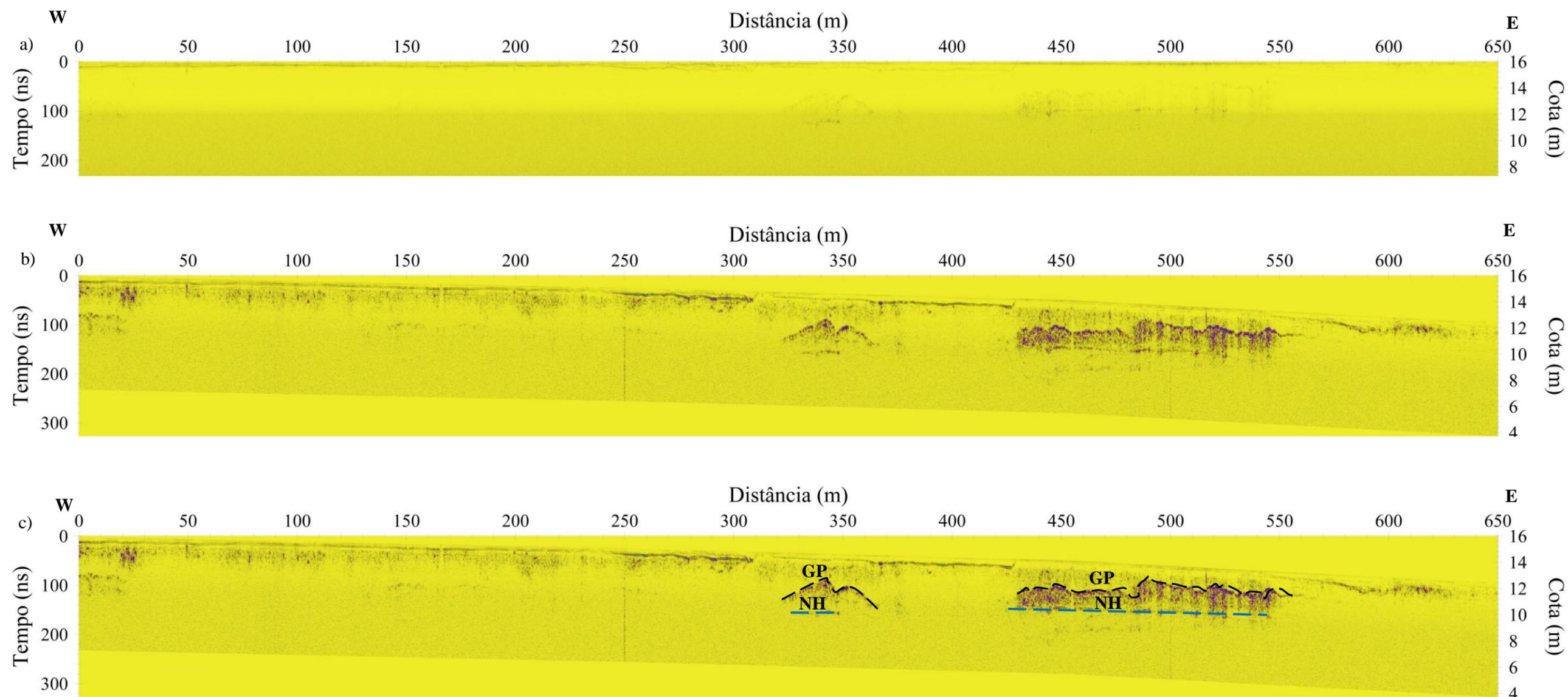


Figura 5.7- a) Perfil 1 bruto (apenas com correção estática). b) Perfil processado. c) Perfil interpretado (macrofeições-Grês do Pará- GP e Nível Hidrostático-NH).

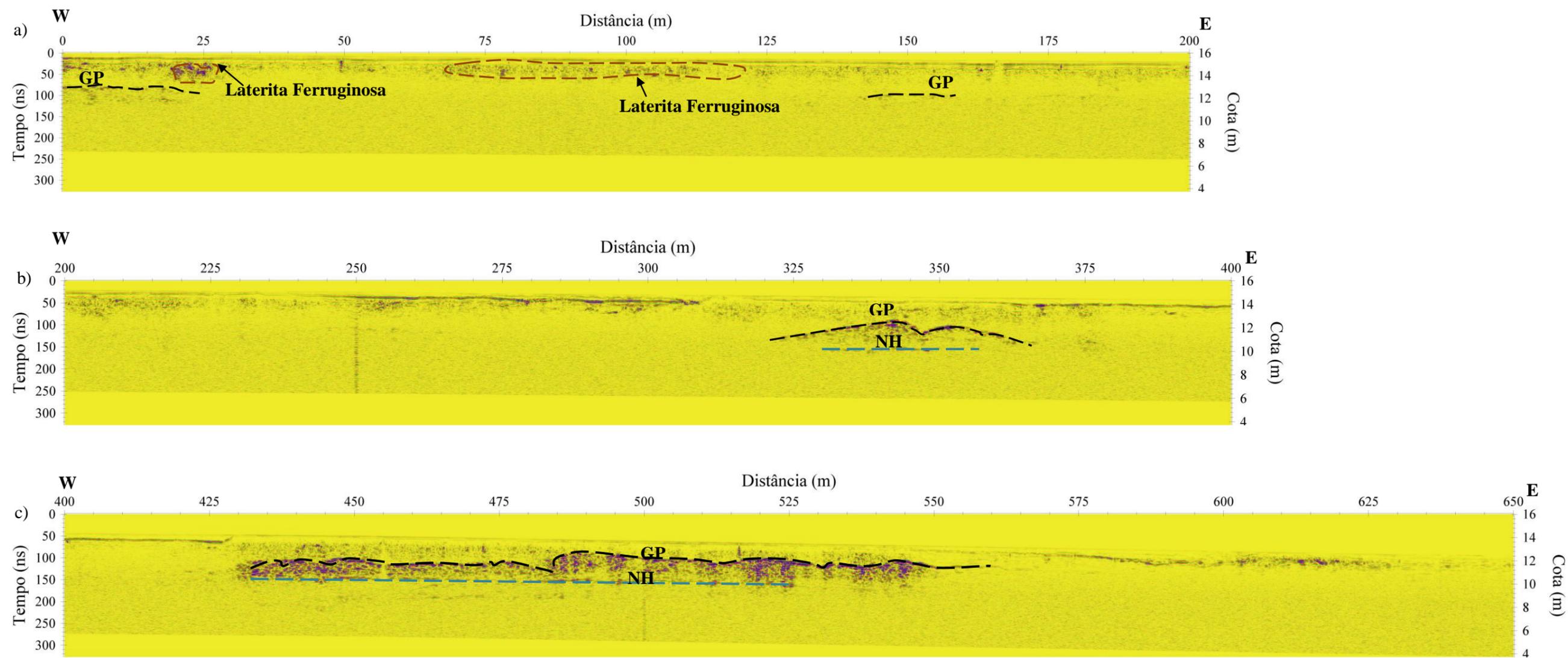


Figura 5.8- Detalhamento do radargrama interpretado do Perfil 1: a) Perfil 1a, b) Perfil 1b e c) Perfil 1c. GP- Grês do Pará e NH- Nível Hidrostático.

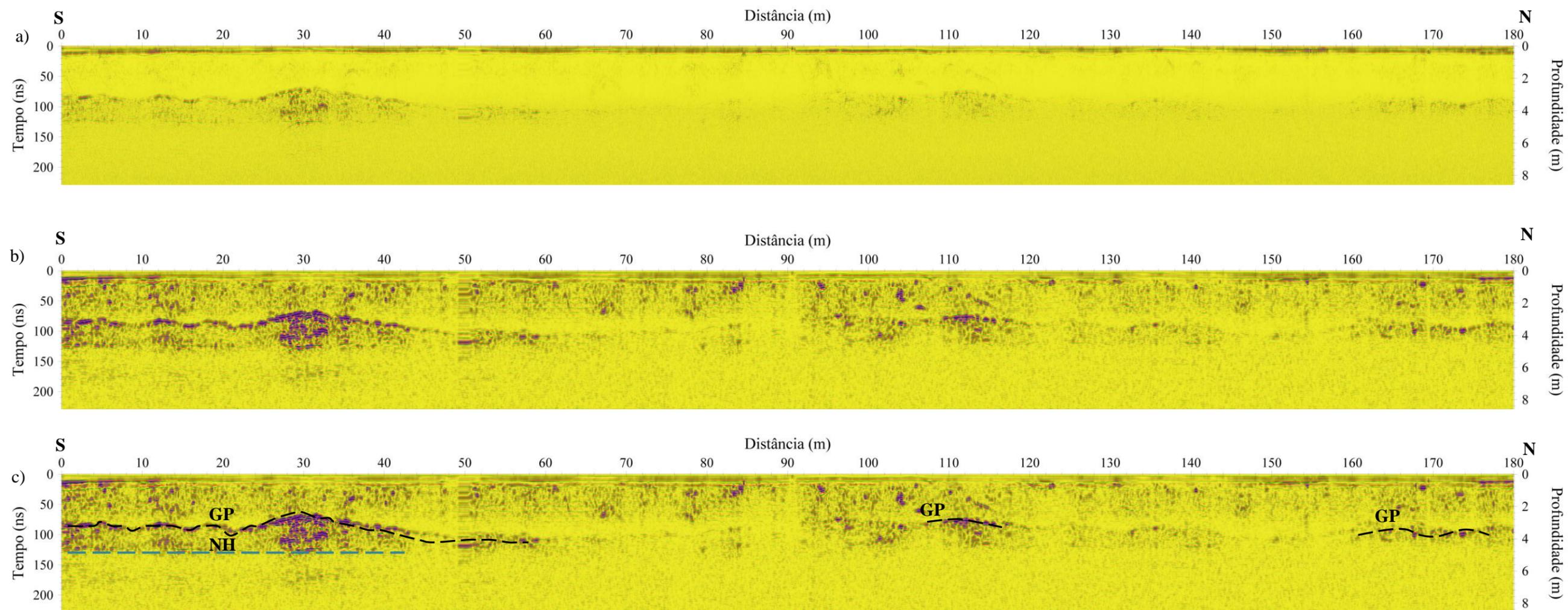


Figura 5.9- Radargramas obtidos no Perfil 2: a) Bruto (apenas com correção estática), b) Processado e c) Interpretado. Feições: Grês do Pará - GP e Nível Hidrostático - NH.

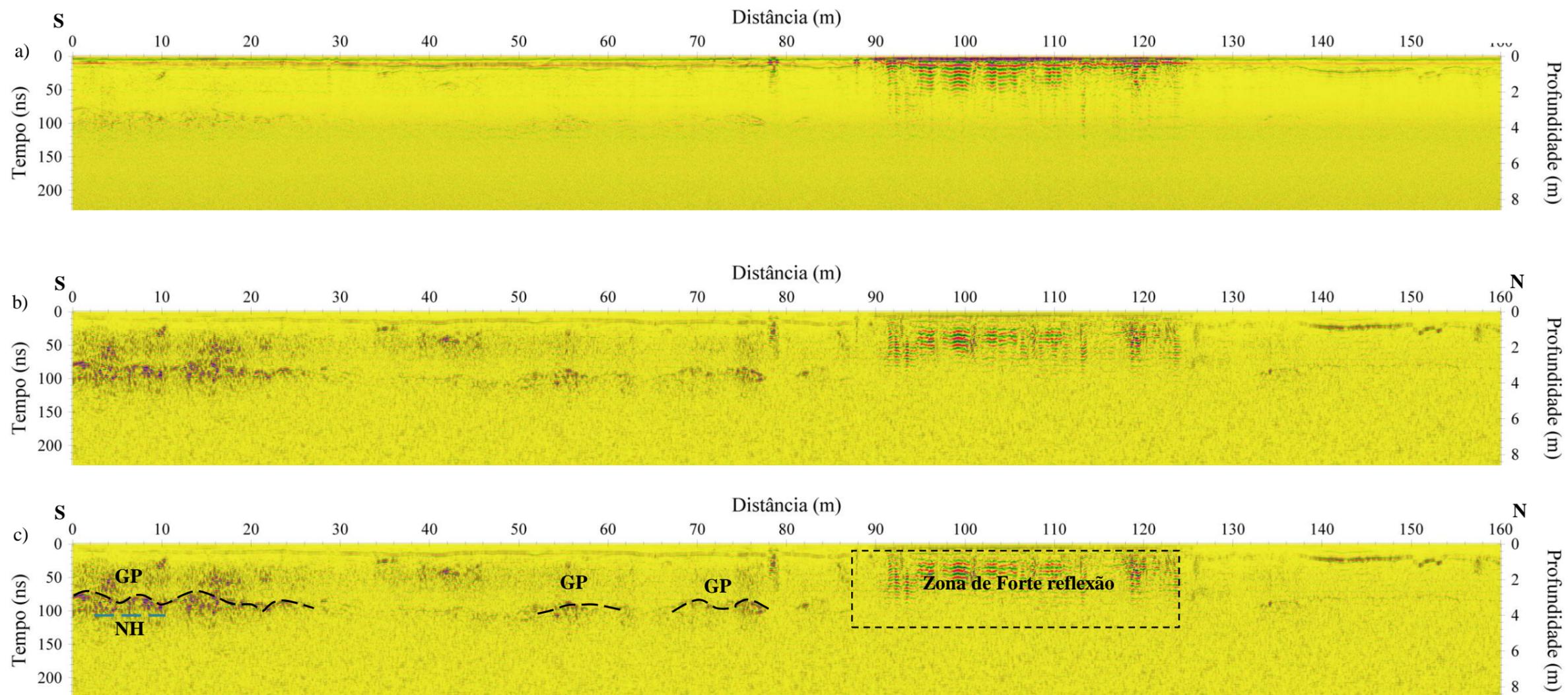


Figura 5.10- Radargramas obtidos no Perfil 3: a) Bruto (apenas com correção estática), b) Processado e c) Interpretado. Feições: Grês do Pará - GP e Nível Hidrostático - NH

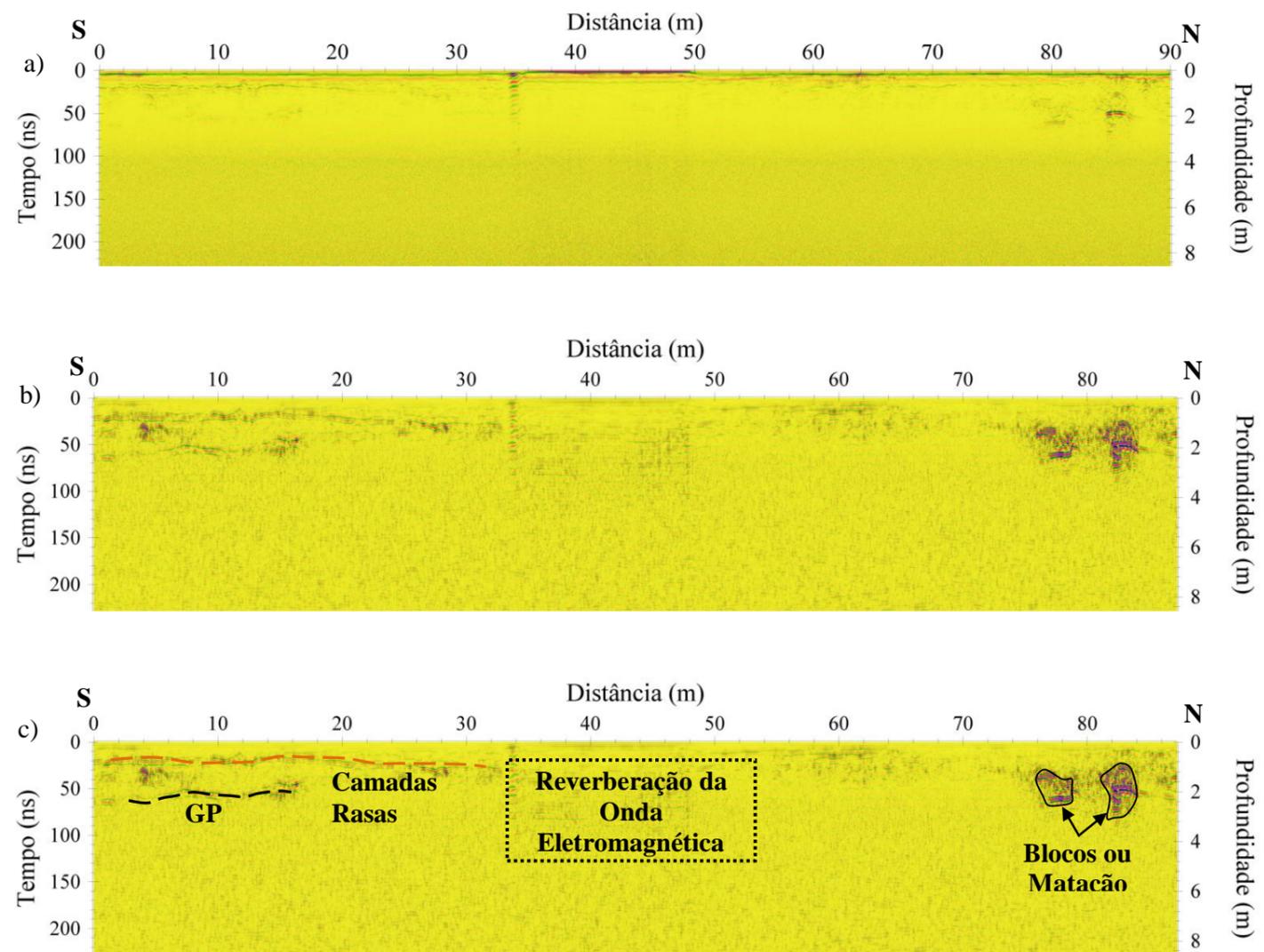


Figura 5.11- Radargramas obtidos no Perfil 4: a) Bruto (apenas com correção estática), b) Processado e c) Interpretado. Feições: Grês do Pará – GP.

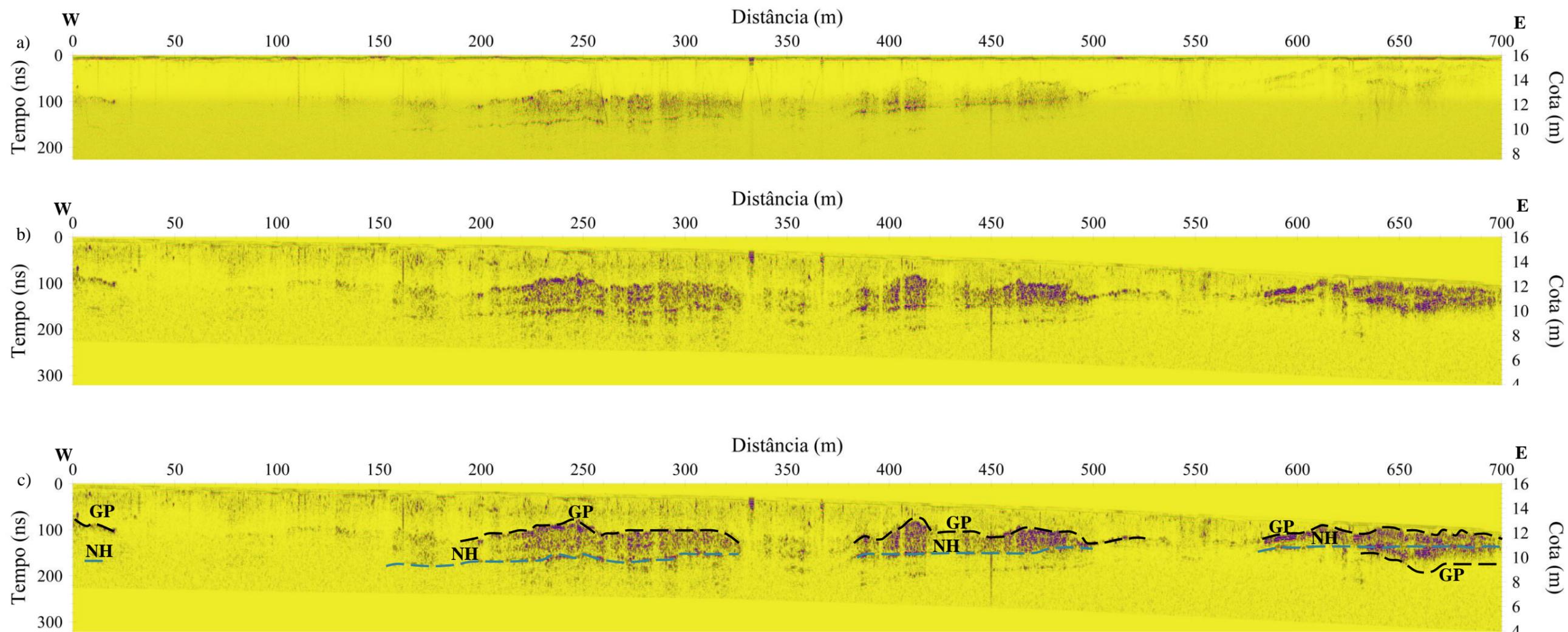


Figura 5.12- a) Perfil 5 bruto (apenas com correção estática). b) Perfil processado. c) Perfil interpretado (macrofeições-Grês do Pará- GP e Nível Hidrostático-NH).

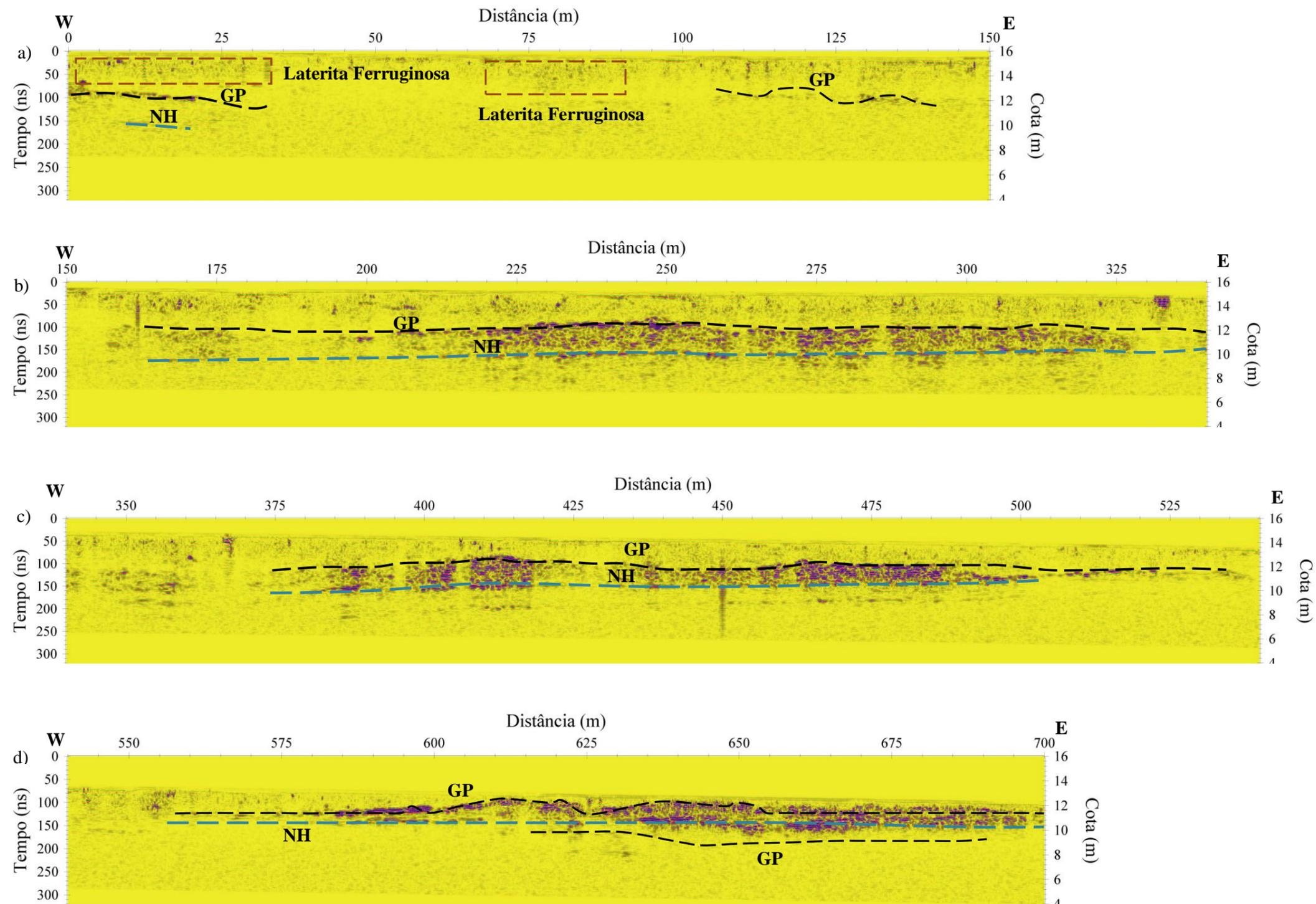


Figura 5.13- Detalhamento do radargrama interpretado para o Perfil 5: a) Perfil 5a, b) Perfil 5b, c) Perfil 5c, d) Perfil 5d, Feições: Grês do Pará- GP e Nível Hidrostático-NH

## 5.5 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS DO GPR

A provável posição do nível freático nos radargramas foi digitalizada. Devido a problemas de acurácia dos pontos coletados com o Sistema de Posicionamento Global (GPS), alguns dados tiveram que ser descartados. Os demais foram submetidos à filtragem da alta frequência espacial ao ser realizada a interpolação dos dados por meio de regressão polinomial, disponível no software Surfer da empresa Golden. Com esse programa foi gerado o modelo espacial do comportamento do nível freático apresentado na Figura 5.14, que mostra acima, segundo o mesmo ângulo de visão, a topografia do terreno já apresentada na Figura 4.2.

O conhecimento do relevo tem grande importância na interpretação dos dados geofísicos, em especial quando o alvo do estudo é o nível freático, pois este, em geral, corresponde à imagem invertida da topografia (exceto quando o nível freático acompanha um paleorelevo). A Figura 5.14, portanto, atesta a utilidade do GPR no mapeamento do nível freático. As profundidades do nível freático estão também compatíveis com aquelas descritas em Damasceno (1996) e Nascimento (2009). A associação do nível hidrostático à Grês do Pará (sotoposto a mesma ou entre a mesma, quando mais próximo à superfície), por outro lado, é consistente do ponto de vista geológico. Essa rocha ferruginosa não-laterítica, composta de grânulos de quartzo na faixa de silte a seixos, em cimento marrom epigenético de oxi-hidróxidos de ferro (goethita e hematita) que, como a laterita, é resistiva e fornece um sinal marcante, sem atenuação, pode ser do tipo que é classificado segundo o modo de ocorrência e origem como rocha ferruginosa de interface. Esse tipo específico é comumente encontrada como lentes na faixa de contato entre camadas arenosas e argilosas, onde há uma abrupta descontinuidade da permoporosidade, a qual se encontrava em zona aquosa oxidante (geralmente o lençol freático), rica em complexos de ferro solúveis (COSTA, 1991). Ela pode, conseqüentemente, servir como guia indireto da posição do nível hidrostático.

A ocorrência de Grês do Pará foi verificada na área por ocasião da escavação para construção do segundo ossuário, próximo ao FORAMB, durante o presente trabalho.

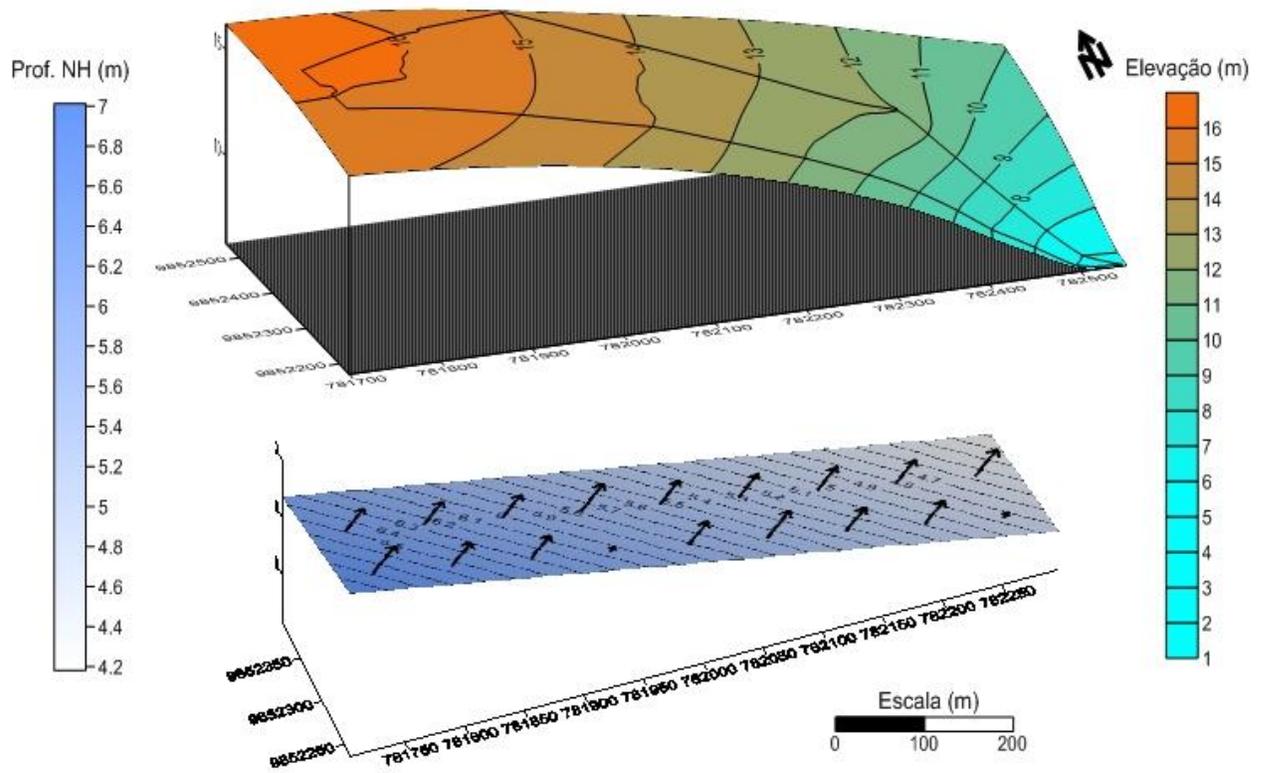


Figura 5.14- Representação do nível hidrostático (abaixo) e da topografia (acima) para a área do cemitério do Tapanã.

## **6 MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA E DA ELETORRESISTIVIDADE**

### **6.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **6.1.1 Polarização Induzida**

A polarização elétrica induzida resulta de um acúmulo de cargas dentro de certas porções dos poros dos sedimentos e rochas. Tudo se passa como se certas camadas na subsuperfície contivessem conjuntos de capacitores que se carregam quando a corrente é ligada e se descarregam quando a corrente é desligada. Existem duas formas básicas de efeitos de polarização de interesse: a polarização de membrana e a polarização de eletrodos (SUMNER, 1976).

Na polarização de membrana (ou, não-metálica ou eletrolítica) durante o fluxo de corrente ocorre a formação de camadas de cátions em torno dos argilo-minerais; é permitida a passagem de transportadores positivos, mas é restringida a dos negativos, o que exerce o efeito de uma membrana (Figura 6.1).

A polarização de eletrodo, metálica ou eletrônica ocorre com rochas que contêm minerais eletricamente condutivos, mesmo que esses minerais não mantenham a continuidade elétrica. Durante o fluxo de corrente, os íons de eletrólitos se movem, acumulando-se na interface dos grãos; dentro de cada grão, cargas elétricas balanceiam as camadas de íons de eletrólitos concentradas nas superfícies do mesmo, que restringem o fluxo da corrente (Figura 6.2).

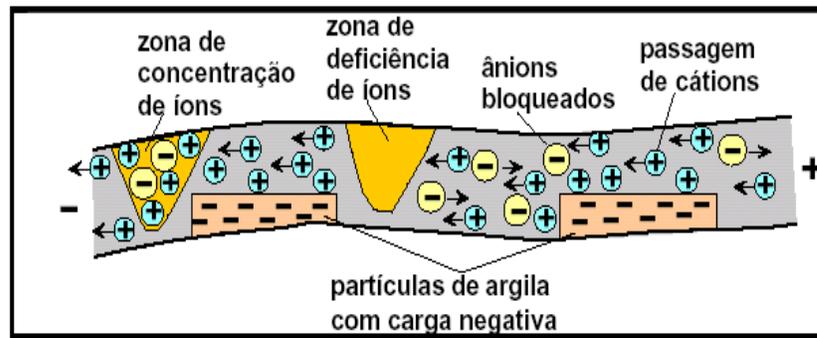


Figura 6.1- Fenômeno de IP- Polarização de membrana.

Fonte: Adaptado de Ward (1990)

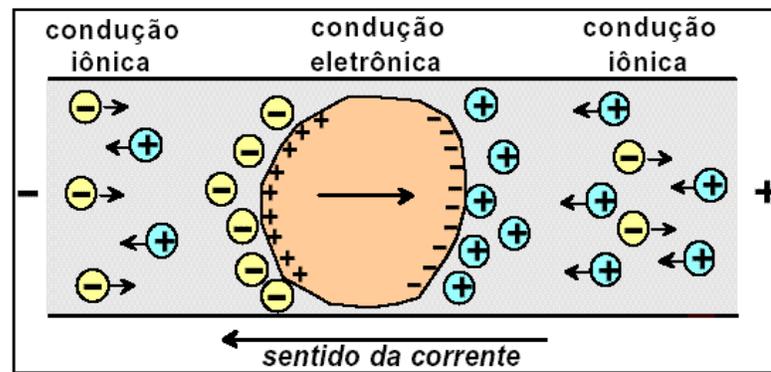


Figura 6.2- Fenômeno IP- Polarização de eletrodo; grão metálico em rosa

Fonte: adaptado de Orellana (1974).

Quando a corrente é desligada, os íons imobilizados seja pelo fenômeno de polarização de membrana, seja pelo de polarização de eletrodo difundem-se gradativamente no eletrólito ambiente para retornarem ao equilíbrio. Esse efeito pode, então, ser medido.

A polarização de membrana pode ser útil na prospecção hidrogeológica e outras, pois a polarização de membrana é um parâmetro suplementar que distingue as rochas portadoras de argila. A polarização de eletrodo, por sua vez, pode ser usada para a localização de minerais-minério condutivos maciços e disseminados.

### 6.1.2 Eletrorresistividade

Os trabalhos de IP permitem, também, obter informações sobre a resistividade da subsuperfície, já que uma corrente elétrica é sempre injetada no solo, através de dois eletrodos

metálicos, gerando uma diferença de potencial que é medida entre dois outros eletrodos inseridos no terreno, o que fornece os valores de resistividade do subsolo (ORELLANA, op.cit.).

Os principais fatores que influenciam na variação da resistividade elétrica dos materiais são: composição mineralógica, quantidade de água presente nos poros dos sedimentos ou rochas, sólidos totais dissolvidos (STD), porosidade e temperatura (FACHIN et al., 2006).

A Figura 6.3 mostra a variação de resistividade elétrica de alguns materiais geológicos.

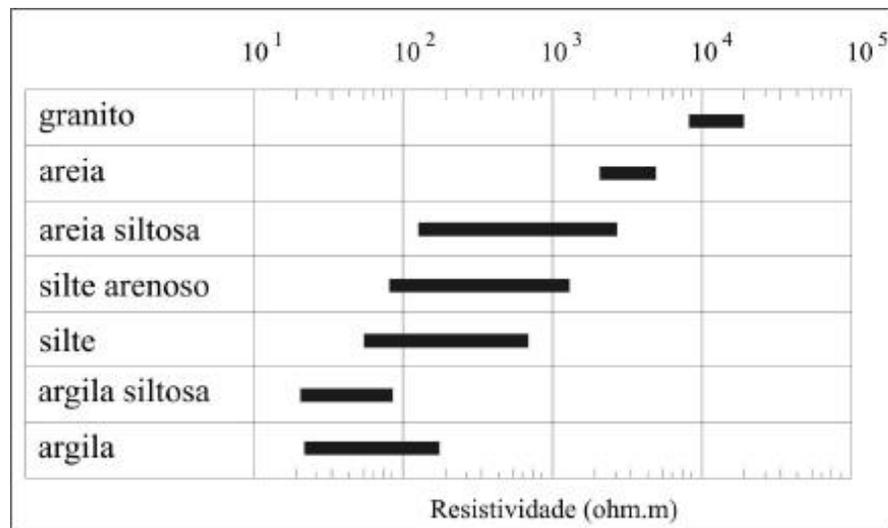


Figura 6.3- Resistividade aparente de alguns materiais geológicos.

Fonte: adaptado de Mcneill (1980)

## 6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

### 6.2.1 Arranjos

Existem várias técnicas de aquisição de dados de campo com os métodos da Polarização Induzida e da Eletroresistividade: Sondagem Vertical, Caminhamento e imageamento ou tomografia.

A sondagem é realizada quando o objetivo do estudo é a observação da variação vertical da resistividade (SEV) ou da Polarização Induzida (SIP), enquanto o caminhamento,

quando o alvo é investigar variações laterais de IP ou resistividade. Finalmente, o imageamento é uma combinação das duas técnicas anteriores que permite, portanto, investigar variações tanto em profundidade como lateral de IP ou resistividade.

Há vários arranjos de eletrodos, como: Schlumberger (mais usado para sondagens), Wenner (mais usado para caminhamento) e o arranjo combinado Wenner-Schlumberger (usado para imageamento). Esses arranjos são mostrados nas figuras 6.4, 6.5 e 6.6, nas quais, A e B, são eletrodos de corrente e M e N, de potencial. No arranjo Schlumberger, os quatro eletrodos são dispostos em linha, com a distância entre os eletrodos de corrente bem maior do que a distância entre os eletrodos de potencial (Figura 6.4).

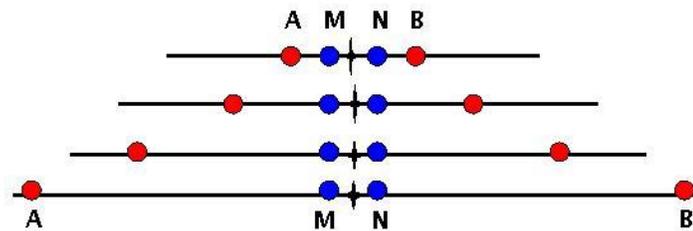


Figura 6.4- Arranjo Schlumberger.

No arranjo Wenner, os eletrodos de corrente e os de potencial são dispostos em linha, de forma equidistante. (Figura 6.5).

Com o arranjo Wenner-Schlumberger, o primeiro nível do imageamento é obtido com os eletrodos percorrendo todo o perfil como no arranjo Wenner. Em seguida, o procedimento é repetido com maiores espaçamentos entre os eletrodos de corrente e potencial (Semi-Wenner), sendo que a partir do terceiro nível ( $n=3$ ), o arranjo torna-se de fato um arranjo Schlumberger, isto é, com a separação entre os eletrodos de corrente muito maior do que a distância entre os eletrodos de potencial. A Figura 6.6 apresenta o arranjo operando até o quarto nível ( $n$ ) de investigação.

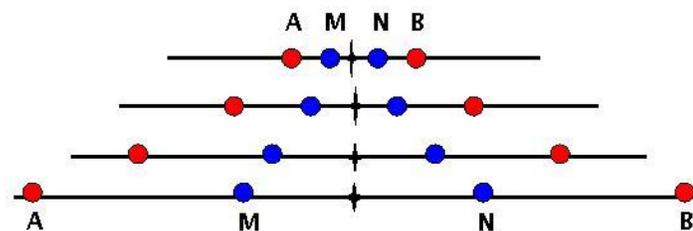


Figura 6.5- Arranjo Wenner.

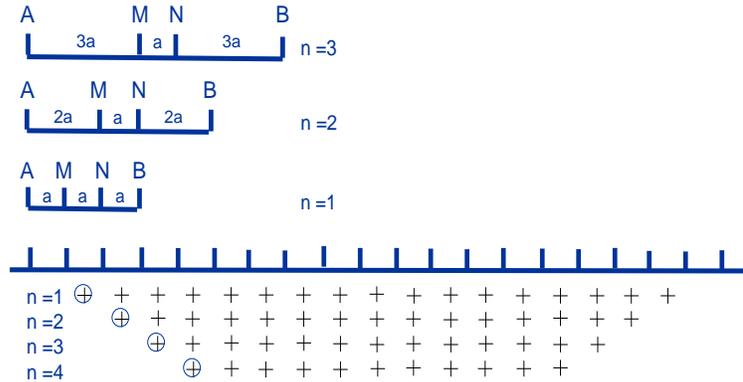


Figura 6.6- Arranjo Wenner-Schlumberger.

Fonte: Costa (2009)

### 6.2.2 Medidas de IP

As medidas de IP podem ser feitas a partir da variação de voltagem em função do tempo (domínio do tempo) ou da variação da resistividade com a frequência (domínio da frequência).

O presente trabalho foi executado no domínio do tempo. Quando as medidas são feitas no domínio do tempo, podem ser usados pulsos de corrente contínua; em um meio polarizável, quando a corrente é desligada, a voltagem no período de descarga não decai imediatamente a zero, mas quase que exponencialmente a zero (Figura 6.7).

A integração da curva de decaimento em certo intervalo de tempo  $t$ , normalizada pela voltagem primária  $V_p$  fornece uma medida do efeito IP conhecida como cargabilidade  $M$  (mV/V):

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_{IP} dt, \quad (6.1)$$

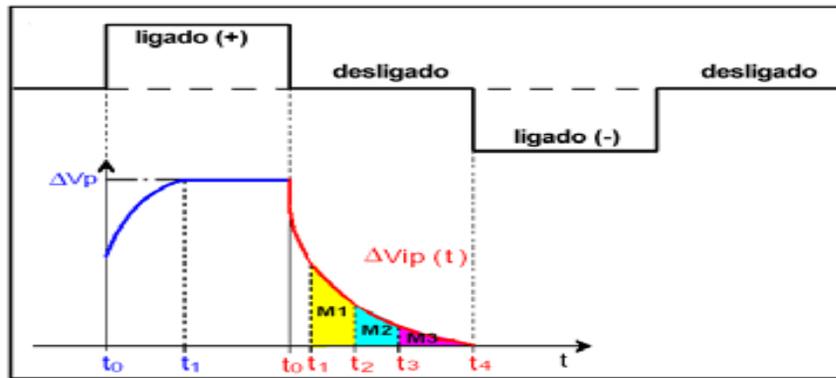


Figura 6.7- Medida de IP no domínio do tempo.

Fonte: Amorim Junior (2003).

### 6.2.3 Medidas de Eletrorresistividade

O método da Eletrorresistividade tem como princípio a injeção de uma corrente elétrica de intensidade  $I$  no terreno por meio de um par de eletrodos denominados A e B com a medição da diferença de potencial  $\Delta V$  entre dois eletrodos de recepção denominados M e N, para o cálculo da resistividade aparente  $\rho_a$ , dada pela equação:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K, \quad (6.2)$$

sendo o fator  $K$  dado por:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\overline{AM}}\right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}}\right) - \left(\frac{1}{\overline{BN}}\right) + \left(\frac{1}{\overline{BM}}\right)}, \quad (6.3)$$

em que  $\overline{AM}$ ,  $\overline{AN}$ ,  $\overline{BN}$  e  $\overline{BM}$  são as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial.

A resistividade aparente não é igual à resistividade do meio, exceto quando o mesmo possui uma única camada, mas uma resistividade “média” do pacote de rochas atravessado.

### 6.2.4 Campanhas de Campo

As medidas de Polarização Induzida e Eletrorresistividade foram realizadas utilizando-se a técnica do imageamento ao longo de um perfil de 13 m no FORAMB entre 2007 e 2008, como mostra o Quadro 6.1, para verificar o comportamento dos alvos ao longo do tempo. O

quadro mostra que os dados de várias campanhas não foram aproveitados, por motivos diversos (roubo de eletrodo, pane instrumental, etc.). Mais precisamente, 57% das campanhas, apenas, foram úteis. O quadro mostra, ainda, que foi realizada uma campanha antes do enterramento dos alvos, cujos dados serão referidos como background (BG).

Quadro 6.1 - Campanhas de campo.

Data	Método geofísico e /ou atividade
13/08/2007	Escolha da área - GPR
30/08/2007	IP – Background (aproveitado)
06/10/2007	Enterramento dos alvos
19/10/2007	IP (dado não aproveitado)
16/11/2007	IP (aproveitado)
14/12/2007	IP (aproveitado)
20/02/2008	IP (dado não aproveitado)
26/03/2008	IP (dado não aproveitado)
29/12/2008	IP (aproveitado)

O levantamento de IP/Resistividade foi realizado com um Imageador modelo IRPI-1000 da GEOTEST Brasil de 1kW e 20 canais (Figura 6.8).

Foram utilizados 20 eletrodos de cobre espaçados de 0,7 m ao longo dos 13 m do perfil com 7 níveis investigação (Figura 6.9). O arranjo utilizado no levantamento foi Wenner-Schlumberger.



Figura 6.8- Equipamento de Eletrorresistividade utilizado na aquisição de dados de resistividade elétrica e cargabilidade.



Figura 6.9- Aquisição de dados de IP e Resistividade.

### 6.3 INTERPRETACÃO

Os resultados foram reunidos sob a forma de pseudo-seções, com as distâncias ao longo do perfil representadas no eixo x, os níveis de investigações, no eixo y e os valores medidos reunidos por isocontornos coloridos. A escala é a mesma para cada conjunto de pseudo-seções, para facilitar a comparação entre as mesmas. A posição do corpo é assinalada com linha tracejada vermelha e a do túnel, com linha tracejada preta. O arranjo de eletrodos, com o espaçamento usado, não atinge a caixa de armas, já que a disposição não cobriu a área onde a caixa foi enterrada.

A interpretação foi realizada por meio do programa de inversão RES2DINV da Geotomo Software, que utiliza o método de inversão da suavidade entre os parâmetros (resistividade) adjacentes (GEOTOMO, 2009). Foram feitas 5 iterações, seguindo o padrão sugerido no manual do programa. Como os alvos têm interface brusca com o meio, o resultado de programa cujo vínculo de inversão é o da suavidade entre as propriedades físicas do meio deverá ser considerado com reservas. A medida do ajuste entre dados das pseudo-seções tanto de cargabilidade como de resistividade, medidas e calculadas para o modelo encontrado por meio da inversão fornecem o desvio padrão médio (RMS).

#### 6.3.1 IP

As pseudo-seções de cargabilidade medida são apresentadas na Figura 6.10. As pseudo-seções de cargabilidade calculada para o modelo físico obtido por meio de inversão estão reunidas na Figura 6.11. Finalmente, o modelo físico obtido com a inversão de cada uma das pseudo-seções de cargabilidade medida aparece na Figura 6.12.

A pseudo-seção com a cargabilidade aparente medida antes do enterramento dos alvos (BG), em agosto de 2007, mostra um ambiente sem a presença de acentuadas heterogeneidades, exceto entre 7 e 8,5 m do início do perfil e entre 9 e 10 m. (Figura 6.10a). O ajuste da pseudo-seção de cargabilidade aparente calculada à pseudo-seção de cargabilidade aparente medida é aceitável (Figura 6.11a), mostrando um RMS de 0,28, de modo que a solução da inversão (Figura 6.12a) é uma aproximação adequada para o modelo físico de cargabilidade para a área. Esse modelo reforça uma terra sem grandes heterogeneidades.

Após a introdução dos alvos observa-se, em novembro de 2007, que a pseudo-seção de cargabilidade aparente medida mostra-se muito mais heterogênea e que, em sua parte média/inferior, os valores aumentam gradativamente (Figura 6.10b). O ajuste entre as medidas e a cargabilidade aparente calculada (Figura 6.11b) forneceu um RMS de 0,34, mas o modelo físico de cargabilidade, em consequência do uso do vínculo da suavidade entre os parâmetros físicos adjacentes, registra uma zona de cargabilidade relativamente elevada na posição aproximada de onde foi enterrado o corpo e uma zona com valores menores onde se encontra o simulado de túnel (Figura 6.12b).

Em dezembro de 2007, quando as chuvas começam, as medidas não são mais tão heterogêneas (Figura 6.10c) e, um ano depois, em dezembro de 2008, ainda sem a presença das chuvas, elas já mostram estar ainda mais próximas do BG (Figura 6.10d). O ajuste entre dados medidos e calculados melhora muito pouco: RMS é 0,28 para dezembro de 2007 (Figura 6.11c) e 0,27, um ano depois (Figura 6.11d). O resultado da inversão são modelos físicos ainda impactados pelos alvos introduzidos, mas retornando para o modelo físico obtido antes da introdução dos alvos (Figura 6.12c e Figura 6.12d).

A interpretação dos resultados de IP não é simples. Essencialmente, a introdução dos alvos perturbou a subsuperfície, rica em argila. A presença de muita argila pode gerar a fixação de íons de tal maneira efetiva que, em realidade, sobrem poucos íons livres para serem bloqueados quando introduzida corrente no meio e, depois, retornarem a posições de equilíbrio quando cessada a corrente, gerando o efeito de IP. A introdução do corpo no ambiente, por conseguinte, produzindo necrochorume rico em sais representa uma fonte extra de íons para o ambiente, aumentando, conseqüentemente, o efeito IP.

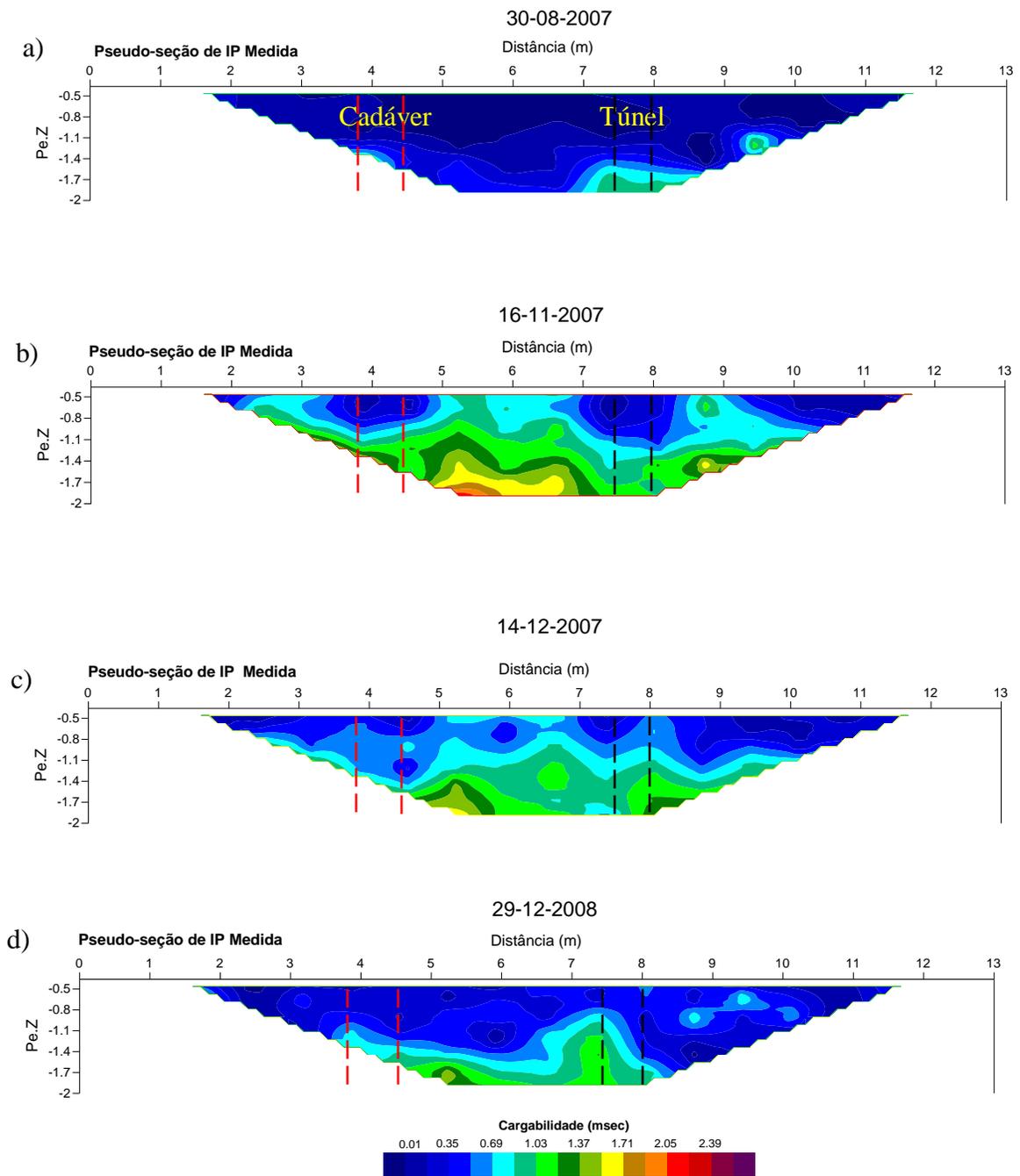


Figura 6.10- IP. Cargabilidade medida: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008

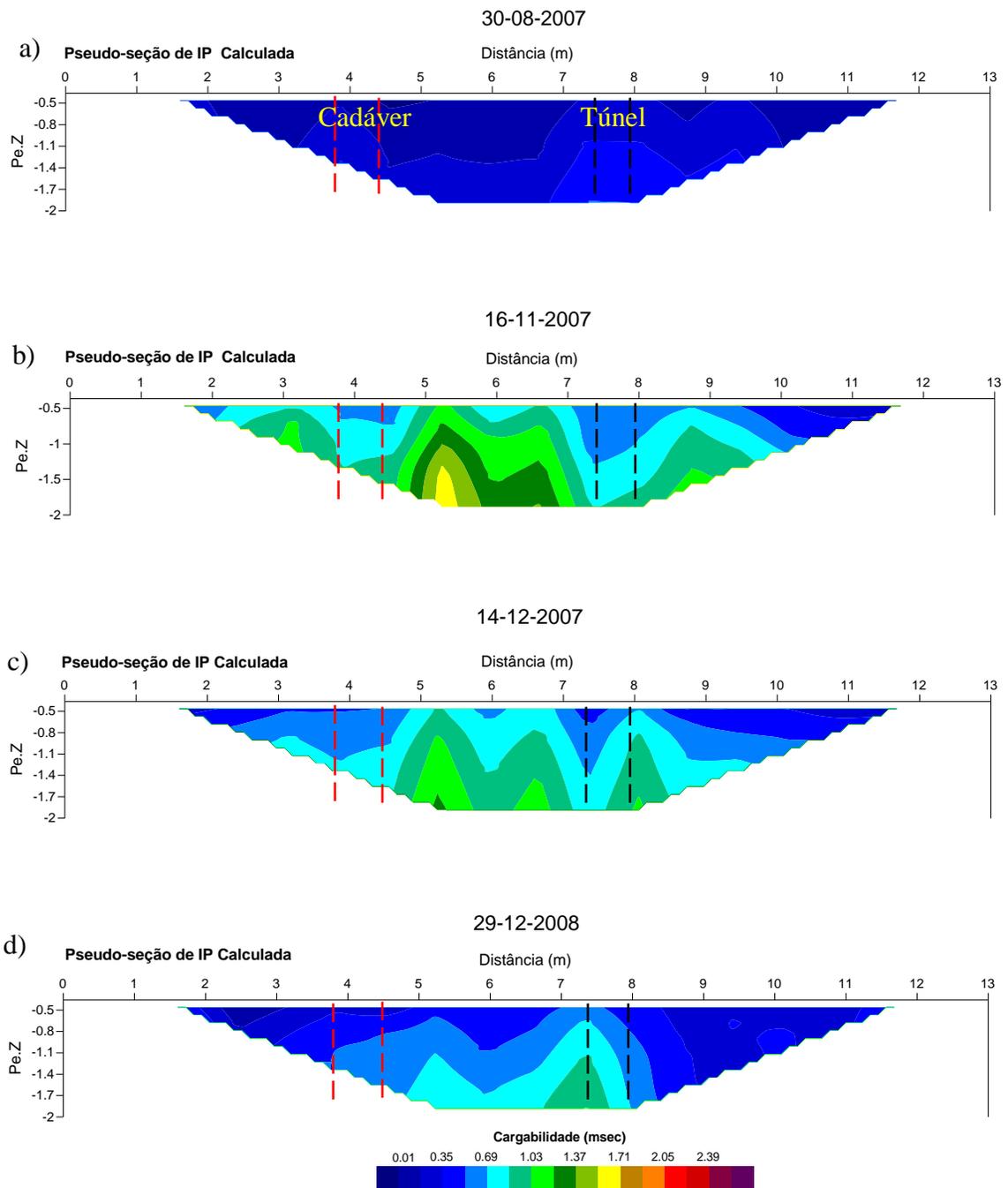


Figura 6.11- IP. Cargabilidade calculada: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) Dezembro/2008.

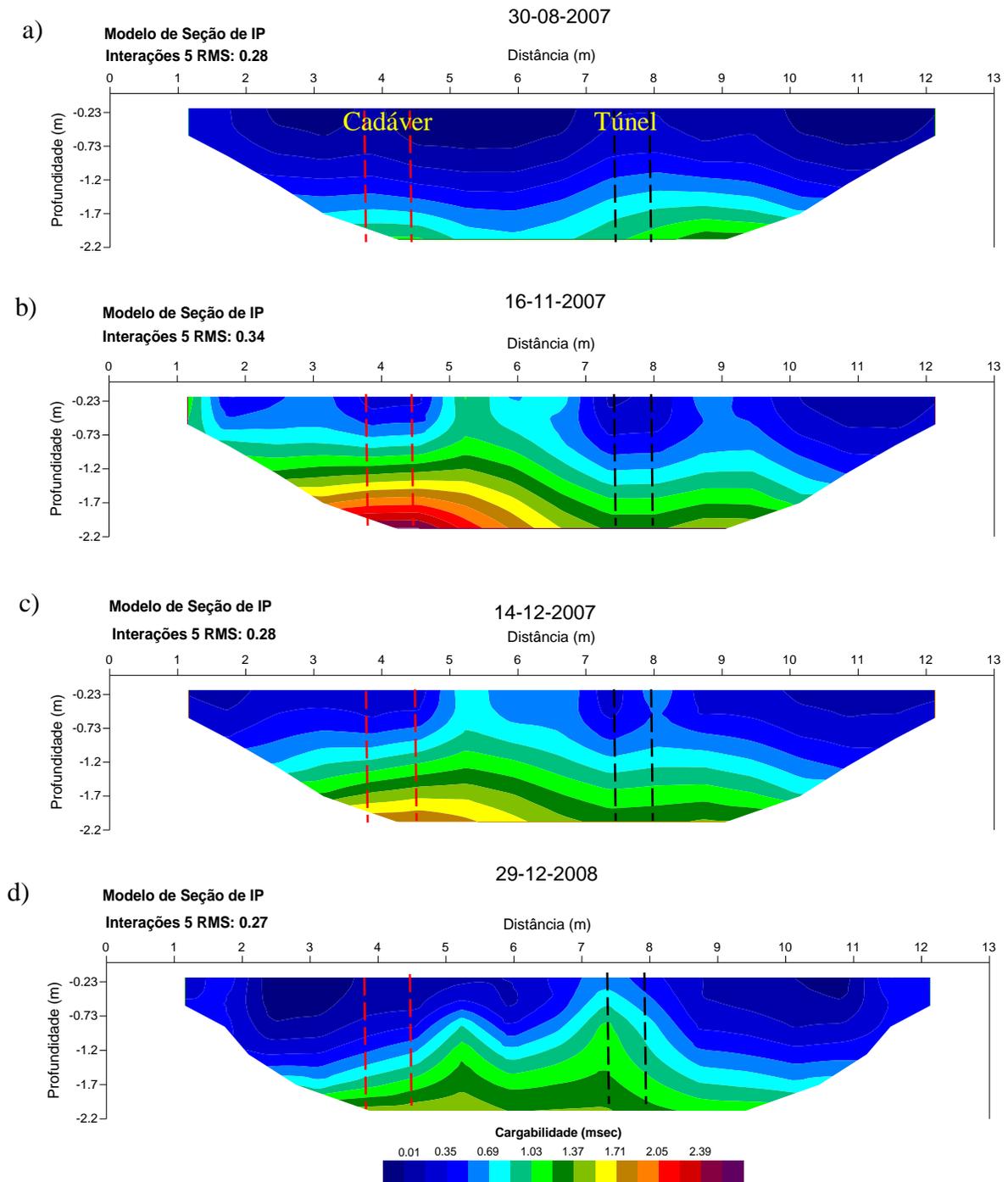


Figura 6.12- IP. Modelo físico solução da inversão: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008.

### 6.3.1 Resistividade Aparente

As pseudo-seções de resistividade aparente medida são apresentadas na Figura 6.13. As pseudo-seções de resistividade aparente calculada para o modelo físico obtido por meio de inversão estão reunidas na Figura 6.14. Finalmente, o modelo físico obtido com a inversão de cada uma das pseudo-seções de resistividade aparente medida aparece na Figura 6.15.

A pseudo-seção com a resistividade aparente medida obtida antes da colocação dos alvos (BG), em agosto de 2007, mostra uma geologia local sem perturbações, acamada. (Figura 6.13a). O ajuste entre dados medidos e dados calculados (Figura 6.14a) mostra um RMS de 2,5 (como a resistividade varia muitíssimo mais do que a cargabilidade, esse valor é excelente). A solução da inversão (Figura 6.15a) é um modelo de distribuição de resistividade para uma terra sem grandes heterogeneidades. Como com a profundidade, a resistividade aumenta gradativamente, pode-se supor que a parte superior é rica em material predominantemente argiloso. Já na faixa intermediária, o sedimento passa a argilo-arenoso e na zona mais profunda podem ocorrer concreções ferruginosas.

Na pseudo-seção de resistividade aparente medidas após a introdução dos alvos, todas elas, mostram uma mudança significativa no local onde os alvos foram enterrados. Tanto o corpo como, principalmente, o simulado túnel, provocam o aumento na resistividade (Figura 6.13b, Figura 6.13c e Figura 6.13d). A inspeção visual dos dados calculados mostra o seu ajuste razoável aos dados medidos (RMS varia de 3,4 a 4,8) (Figura 6.14b, Figura 6.14c e Figura 6.14d). Os modelos de resistividade obtidos com a inversão mostram claramente o simulado de túnel bem como dão pista da presença do corpo (Figura 6.15b, Figura 6.15c e Figura 6.15d), denotando a impropriedade do vínculo da suavidade utilizado na inversão.

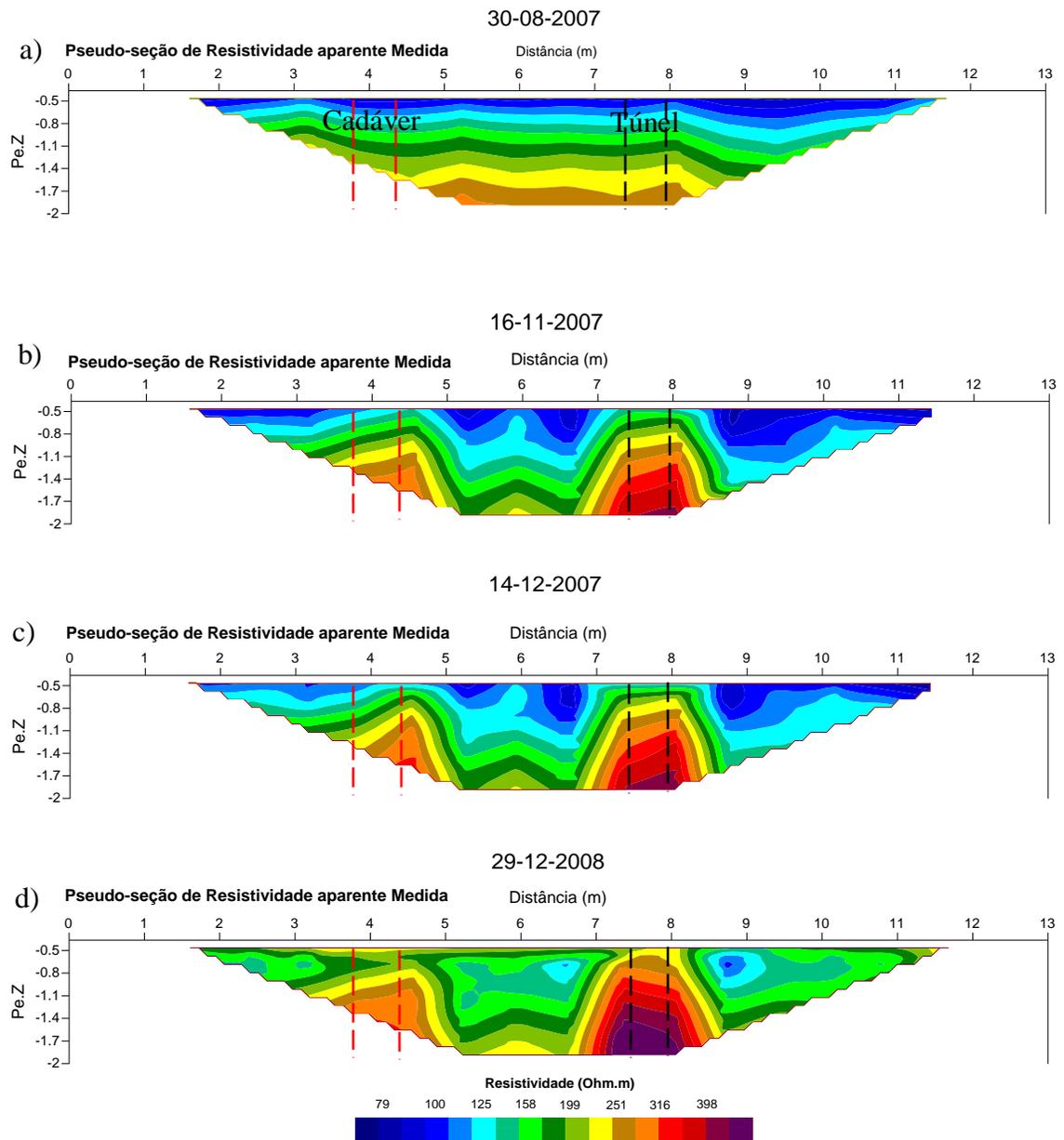


Figura 6.13- Eletrorresistividade. Resistividade aparente medida: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008.

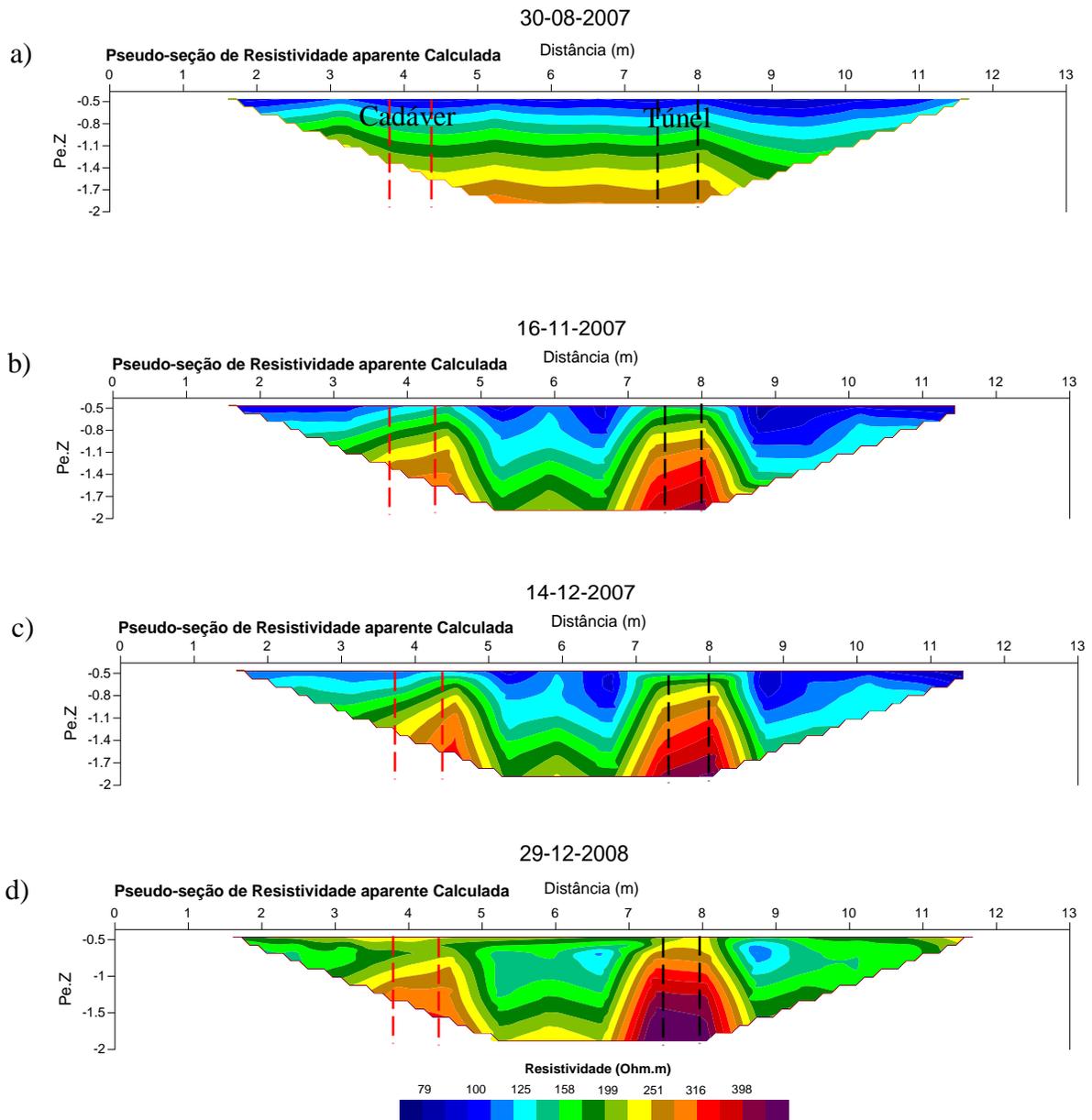


Figura 6.14- Eletrorresistividade. Resistividade aparente calculada: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008.

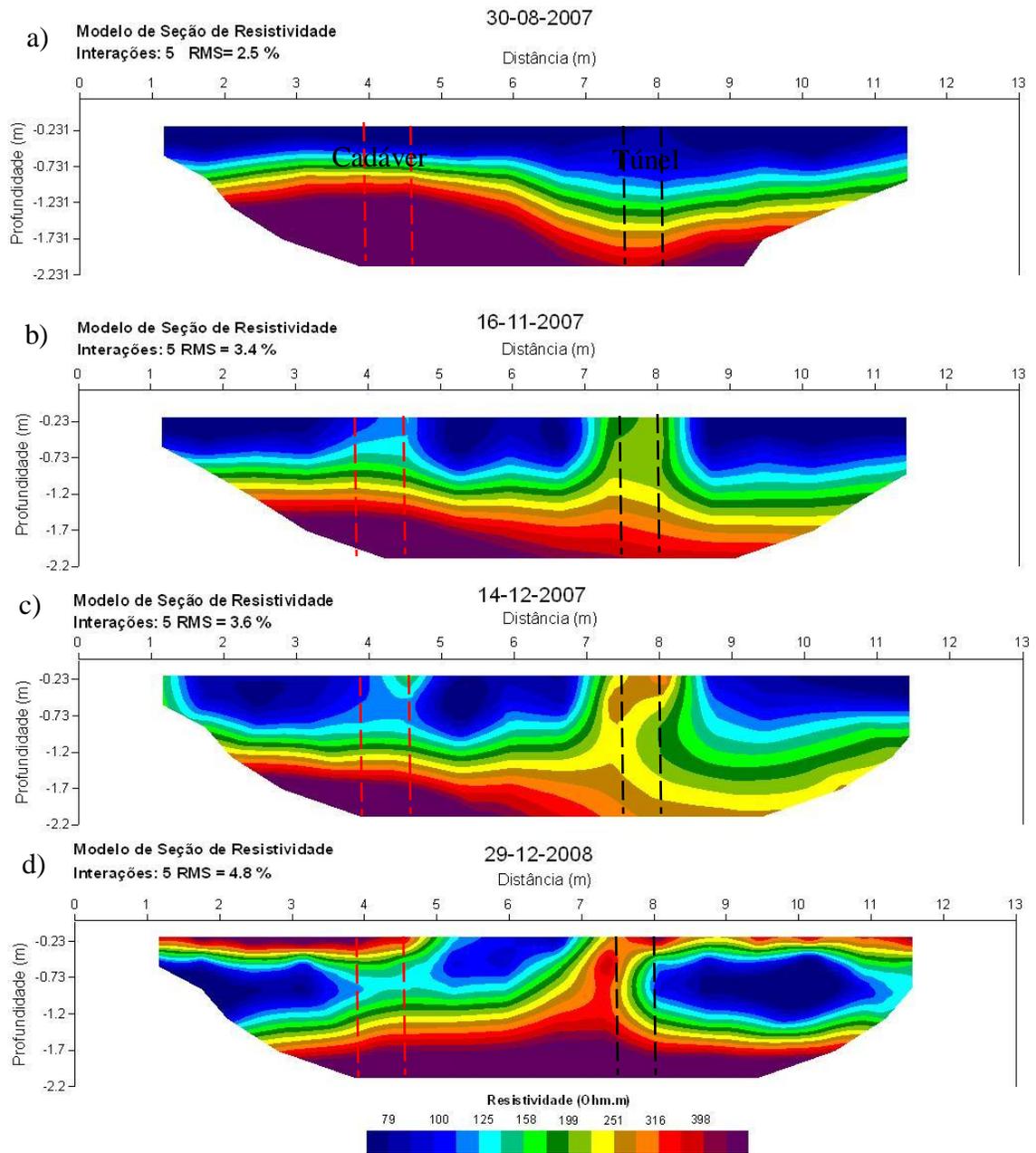


Figura 6.15- Eletrorresistividade. Modelo físico solução da inversão: a) agosto/2007 (BG), b) novembro/2007, c) dezembro/2007 e d) dezembro/2008.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo geofísico realizado com o GPR detectou o NH a aproximadamente 7 m na parte mais alta da necrópole, na parte média entre 5 m e 3 m e na parte mais baixa entre 2 m e 1 m. Deve-se mencionar que os dados foram coletados em apenas um período do ano, pois a sazonalidade interfere na profundidade do nível d' água. A representação tridimensional do NH é compatível com dados coletados e com a topografia, embora seu mapeamento tenha enfrentado as seguintes dificuldades: a presença do manto de intemperismo rico em argila e a existência de passarelas de cimento, materiais, ambos, que absorvem água e, conseqüentemente, atenuam a onda eletromagnética. Portanto, e de acordo com a legislação ambiental federal e estadual aplicada a cemitérios a parte mais baixa da necrópole é inadequada para a inumação.

Já o estudo com Polarização Induzida e Eletroresistividade no campo de testes FORAMB mostrou-se mais útil para a Geofísica Forense, pois não foi possível compreender o comportamento ambiental do necrochorume, uma vez que a lona plástica que estava envolta o cadáver pode ter funcionado como isolante dificultando assim a liberação do líquido intermitente e mascarando os resultados.

Os dados de IP são de difícil interpretação, mas os resultados mostram algo melhor o enterramento do corpo do que o túnel. Já a Eletroresistividade evidenciou igualmente os alvos, em especial o túnel, como era de se prever, pela presença de ar. Pode-se afirmar que com esses métodos podem ser obtidos muito bons resultados de Geofísica Forense no ambiente amazônico.

Sugere-se para trabalhos futuros a modelagem da resposta dos alvos para verificar se um espaçamento entre os eletrodos menor do que o utilizado é mais indicado, bem como usar eletrodos não metálicos tentando melhorar a eliminação da polarização de eletrodos (feita eletronicamente com o equipamento usado).

A presença de argila, que pode ser inferida das zonas atenuadas dos radargramas e pela parte superior das pseudo-seções, mais o clima amazônico, independente do NH que, como foi mapeado, na maior parte do cemitério, a oeste, não é inferior a 2 m, pode explicar as notícias de saponificação recebidas durante a execução deste trabalho.

Além dos aspectos conclusivos da geofísica propriamente dita, outras informações de cunho social são importantes para a sociedade. Por exemplo, o estudo dos impactos de um cemitério certamente não pode ser vistos apenas do ponto de vista técnico, foco deste trabalho. Há também outras dimensões igualmente importantes, porque seu impacto é social, econômico, urbanístico e psicológico.

Assim, a saponificação associada à argila do manto de intemperismo comum na Amazônia apontada pelas pistas dadas pela Geofísica, por exemplo, contrapõe-se à explicação do fenômeno pelo NH extremamente baixo, caso observado no Cemitério do Bengui. Daí decorre que o fenômeno de saponificação é muito mais freqüente na Amazônia do que seria o esperado com base na posição do NH. Segundo os dados fornecidos pela SEMAD estima-se que, em menos de dois anos, não haverá mais áreas livres no cemitério para inumação, em parte porque a exumação nem sempre pode ocorrer devido ao fenômeno de saponificação.

Esses fatos mostram a necessidade de modificação da legislação para que seja substancialmente aumentado o tempo para inumação nos cemitérios rotativos bem como incentivada, do ponto de vista geológico, a vocação da região para crematórios. Ambos, mudança na legislação e construção de crematório reduziriam a carga de necrochorume e, conseqüentemente, de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM JUNIOR, V. **Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Urucuaia na bacia do Rio das Fêmeas Usando IP-Resistividade**. 2003. 96 f, Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Curso de pós-graduação em Geofísica. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2003.
- BELÉM. SECRETARIA MUNICIPAL DE ADMINISTRAÇÃO- SEMAD. **Informações Obtidas em meio digital-e-mail**. 2008.
- BORGES, W. R. **Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade**. 2002. 153 f. (Dissertação de Mestrado) - Departamento de Geofísica, IAG/USP, São Paulo, 2002.
- BORGES, W. R. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**. 2007. 256 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BRAZ, V. N.; SILVA, L. C. E. ; MENEZES, L. B. C. **Integração de resultados bacteriológicos e geofísicos na investigação da contaminação de águas por cemitérios**. In: CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2000, Fortaleza. 1 CD-ROM.
- CARVALHO FILHO, José dos Santos. **Manual de Direito administrativo**. 13. ed., Rio de Janeiro: Lumen Júris, 2005.
- CARVALHO JUNIOR, M. A. F. **Aplicação de Métodos Geofísicos ao Estudo de Águas Subterrâneas na Grande Belém (Caso Cemitério do Bengui)**. 1997. 64 f. TCC (Graduação) – Curso de Graduação em Geofísica/CG/UFPA, Belém, 1997.
- CARVALHO JUNIOR, M. A. F.; SILVA, L. M. C. Métodos Geofísicos aplicados ao Estudo do Fluxo da Água Subterrânea sob Cemitério. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA AO MEIO AMBIENTE, 1, 1996, Belém. **Resumos Expandidos**. Belém: SBGF, 1996, p. 47-49.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DA ÁREA METROPOLITANA DE BELÉM (CODEM). **Plano de Desenvolvimento da Grande Belém**: metodologia, estudos básicos, prognósticos, desenvolvimento e sistemas. Belém, 1975. v. 1, tomos 1 e 2.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DA ÁREA METROPOLITANA DE BELÉM (CODEM). **Mídia digital, contendo dados vetoriais**: curvas de nível, logradouros e edificações. 1998.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL(CETESB). **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. Projeto de Cooperação Técnica Brasil-Alemanha/CETESB GTZ. 2. ed., São Paulo, 2001. 398 p.

COSTA, A. S. **Resistividade, potencial espontâneo e radiometria aplicados a investigação ambiental e forense no campo de testes do cemitério do Tapanã (Belém-PA)**. 2009. 43 f. TCC (Graduação) – Curso de Graduação em Geofísica/IG/UFPA, Belém, 2009.

COSTA, M. L. Aspectos Geológicos dos Lateritos da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 2, p. 146-160, 1991.

DAMASCENO, F. F. et al. Termo de referência para implantação de cemitérios. Esforço conjunto SECTAM/UFPA/SEICOM. Belém. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA AO MEIO AMBIENTE, 1, 1996, Belém. **Resumos Expandidos**. Belém: SBGF, 1996, p. 77-80.

DAMASCENO, F. F. **Levantamento Geofísico do Cemitério do Tapanã**. 2001. 67 f. TCC (Graduação) - DGF/CG/UFPA, Belém, 2001.

DANIELS, D. J. **Surface Penetrating Radar**. Londres: The Institution of Electrical Engineers, 1996.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v. 37, p. 531-551. 1989.

DENT, B. B.; KNIGHT, M. J. Cemeteries: a special kind of landfill. Melbourne. In: PROCEEDINGS OF IAH SUSTAINABLE SOLUTIONS CONFERENCE, February, 1998, Melbourne: Kenilworth, **International Association of Hydrologists**. 1998, p. 4516.

DOURADO, J. C. et al. Utilização de radar de penetração no solo na detecção de estruturas artificiais rasas no solo. **Revista Geociências**, v. 22, n. especial, p. 75-81, 2003.

FACHIN, S. J. S. et al. Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n.1, p. 129-138, 2006.

FARIAS, E. S. et al. 1992. **Relatório de Estágio de campo III, área Belém**. UFPA. Departamento de Geologia. 318p.

FÁVERO, F. **Medicina Legal**. 12. ed. Belo Horizonte: Vila Rica Editoras Reunidas, 1991.

FRANÇA, G. V. de. **Medicina Legal**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1985. 402p.

GEOTOMO SOFTWARE. **Geoelectrical Imaging 2D & 3D**. Disponível em: <[www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com)>. Acesso em: 20 jul. 2009.

GREENHOUSE, J. P. **Aplicações de Metodologias Geofísicas em Estudos Ambientais e Geotécnicos**. CEA/UNESP Rio Claro, 1996, 111p.

GSSI - GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS, INC. **Manual do TerraSIRch SIR System-3000**. 2003. 71 p.

IDESP- INSTITUTO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO-SOCIAL DO PARÁ. Coordenadoria de Pesquisa de Recursos Naturais. 1980. **Projeto de Reconhecimento dos Recursos Naturais da Região Metropolitana de Belém: Reconhecimento Hidrogeológico**. Belém, 11p.

IGREJA, H. L. S. et al. Estudos neotectônicos nas ilhas de Outeiro e Mosqueiro- nordeste do estado do Pará. In CONG. BRAS. DE GEOL., 36., 1990, Natal. **Anais...** Natal: SBG, 1990. p. 2110- 2123.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Projeto REMAM – **Rede de Monitoramento de Eventos Extremos na Amazônia. Dados diários de precipitação pluviométrica em Belém, estação convencional do INMET**. Belém, 2007. 1p. Planilha eletrônica em Excel. Trabalho não publicado.

LUIZ, J. G. et al. Medidas magnéticas, eletromagnéticas e elétricas no ambiente natural do campo de testes da UFPA. In: Tenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2007, Rio de Janeiro. **Unveiling the Earth**, 2007. p. 1-6.

LUIZ, J. G.; SILVA, M. C. S. **Geofísica de Prospecção**. [S.l.]: Universidade Federal do Pará. Cejup, 1995.

MATOS, B. A. **Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismo no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo**. 2001. 113 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Curso de Pós-graduação, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MATTA, M. A. da S. **Fundamentos Hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região metropolitana de Belém/Ananindeua-Pará, Brasil**. 2002. 292 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-graduação/CG, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

McNEILL, J. D. **Electrical conductivity of soils and rocks**. Geonics Limited, [S.l.: s.n.], 1980, 22 p. (Technical Note TN-5)

MERCÊS, S. **Relatório Ambiental da Região Metropolitana de Belém- RMB**. Belém: COHAB. 1997.

MILSOM, J. **Field geophysics**. 3rd ed. Chichester: John Wiley. 2003. 174 p.

MIOTTO, S. L. **Aspectos geológico-geotécnicos da determinação da adequabilidade de áreas para implantação de cemitérios**. 1990. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1990.

MOREIRA, C. A. et al. Aplicação da técnica de Caminhamento Elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 1-10, 2006.

NASCIMENTO, W. G.; **Investigação Geofísica Ambiental e forense com os métodos radar e LIN nos cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém – Pa)**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) Programa de Pós-graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2009.

ODIÁRIO DO PARÁ. **Geofísica Auxilia em Investigações Criminais**. Disponível em: <<http://www.diariodopara.com.br/N-53702.html>>. Acesso em: 27 Jul. 2009.

PARÁ. SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO ORÇAMENTO E FINANÇAS-SEPOF. Diretoria de pesquisas e informações sócio-econômicas. **Estatística municipal**. 2008.

PINHEIRO, R. V. L. **Estudo Hidrodinâmico e Sidimentológico do Estuário Guajará Belém (PA)**. 1987. 164 f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 1987.

PIRES, A. C. B. **Pesquisando em subsuperfície: Geofísica Forense**. *Revista Perícia Federal*, Brasília, v. 3, n. 10, p. 24-29, 2001.

PORSANI, J. L. et al. O Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP: Instalação e Resultados GPR 2D-3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, v. 24, p. 49-61, 2006.

PORSANI, J. L. et al. A. Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 22(3): 245-258. 2004. v. 24, n. 1.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT W.; GOÉS, A. M. Estudo Peleoambiental e Estratigrafia dos Sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na Região Bragantina, Nordeste do Pará. **Belém, Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, v. 1, n. 1, p. 24-74. 1989.

ROOSEVELT, A. C.; **Moundbuilders of the Amazon: Geophysical Archaeology on Marajo Island, Brazil**. San Diego: Academic Press, 1991. 495 p.

SILVA, L. M. C.; SOUZA, D. M. Condutividade LIN em áreas de inumações de diferentes do Cemitério do Tapanã, Belém/PA, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 3., 2008, Belém. **Resumos...** Belém: SBGf, 2008. 1 CD-ROM.

SILVA, L. M. C. et al. FORAMB: campo de testes controlados para Geofísica Forense, ambiental e de resgate. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 3., 2008, Belém. **Resumos...** Belém: SGGf, 2008. 1 CD-ROM.

SILVA, L. M. Cemitérios: fonte potencial de contaminação dos aquíferos livres. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA, 4., 1998, Montevideo. **Memórias**. Montevideo: ALHSUD, 1998. v. 2, p. 667-681.

SILVA, L. M. Degradação Ambiental Causada por Cemitérios. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 1. 1994, Juiz de Fora. **Anais**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 1994.

SILVA, L. M. **Os cemitérios na problemática ambiental**. In: SEMINÁRIO NACIONAL CEMITÉRIOS E MEIO AMBIENTE, 1995, São Paulo: SINCESP, ACEMBRA, 1995.

SILVA, R. W. C. et al. Aplicação do método da resistividade elétrica em estudos de contaminação em cemitério - caso de Vila Rezende Piracicaba/SP. In: INTERNATIONAL CONGRESSO OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 10<sup>th</sup>., 2007, [**Anais...**] Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2007.

SUMNER, J. S. **Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration**. Elsevier Scientific Publishing, Amsterdam. 1976. 227 p.

VIEIRA, L.; SANTOS, P. **Amazônia**: seus solos e recursos naturais. São Paulo. 1987. 416 p.

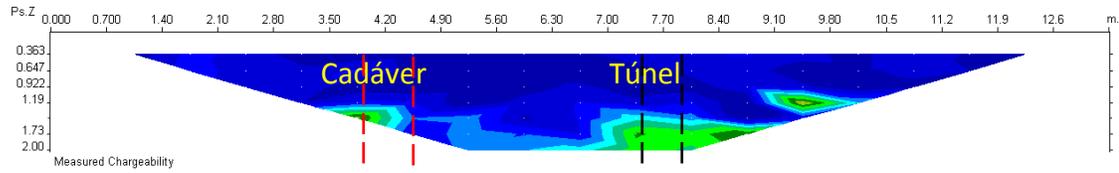
WARD, S. H. Resistivity and Induced polarization methods, In: WARD, S.H. (Ed.). **Geotechnical and Environmental Geophysics**. 2<sup>a</sup> ed. Tulsa- Oklahoma: Society Exploration Geophysicists, 1990. v. 2, p. 147-189.

WARD, S. H.; HOHMANN G. W. Electromagnetic theory for geophysical applications. In: NABIGHIAN MN (Ed.). **Electromagnetic methods in applied geophysics**: theory. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1987. v.1, p. 131-311. (Series Investigations in Geophysics, v.3).

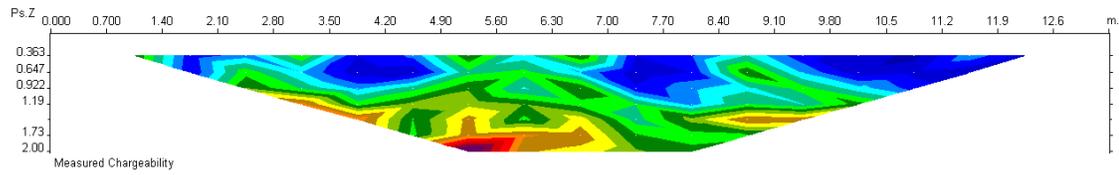
## **ANEXOS**

**ANEXO A- PSEUDO-SEÇÕES DE CARGABILIDADE MEDIDA**

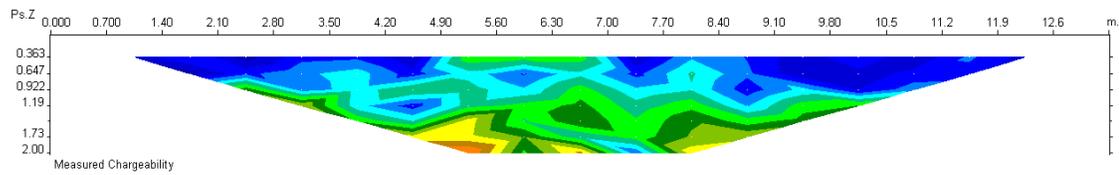
30- 08- 2007



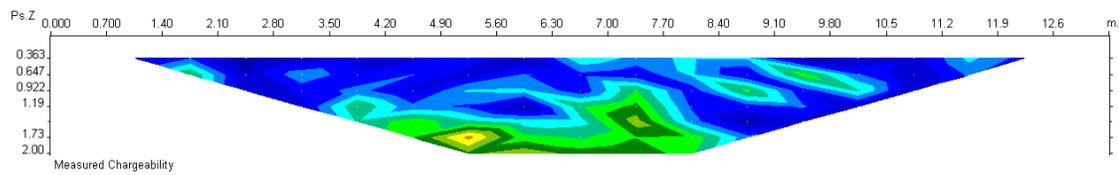
16- 11- 2007



14- 12- 2007

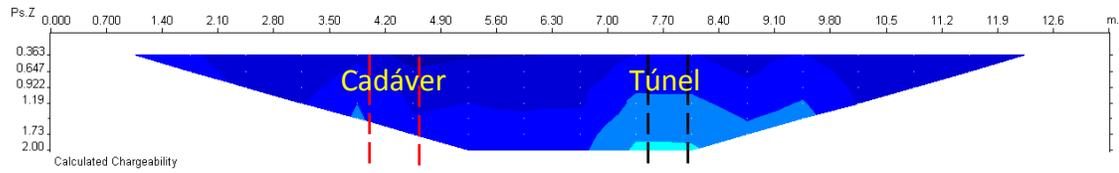


29- 12- 2008

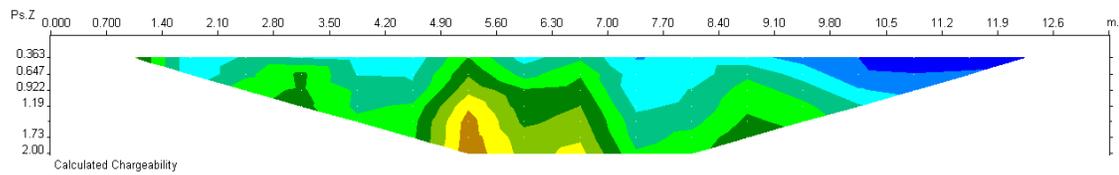


## ANEXO B- PSEUDO-SEÇÕES DE CARGABILIDADE CALCULADA

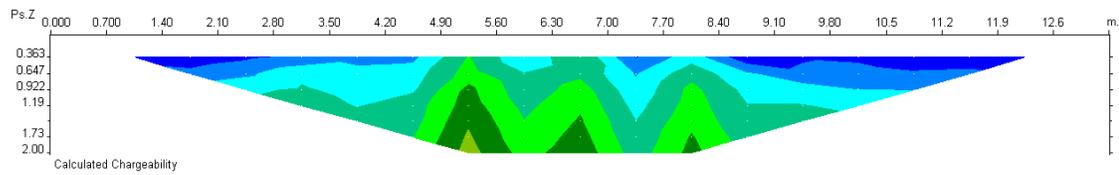
30- 08- 2007



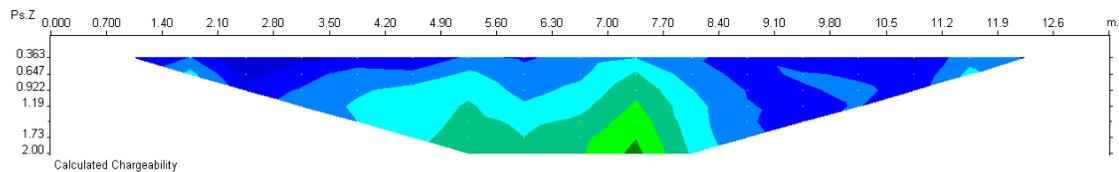
16- 11- 2007



14- 12- 2007

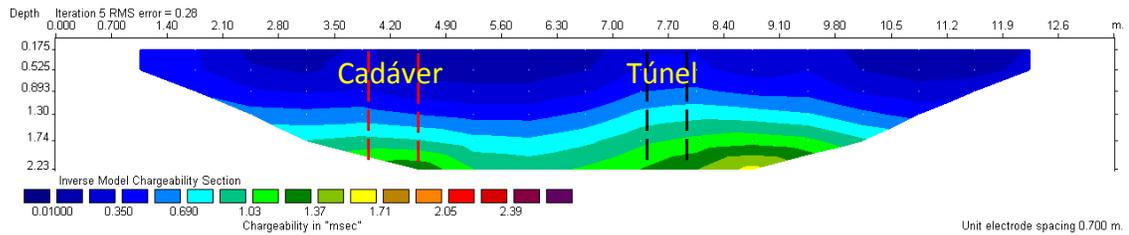


29- 12- 2008

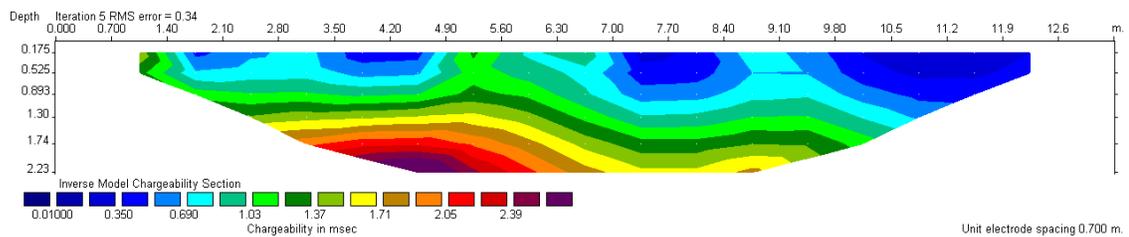


## ANEXO C- MODELOS FÍSICOS OBTIDOS COM A INVERSÃO DAS PSEUDO-SEÇÕES DE CARGABILIDADE MEDIDA

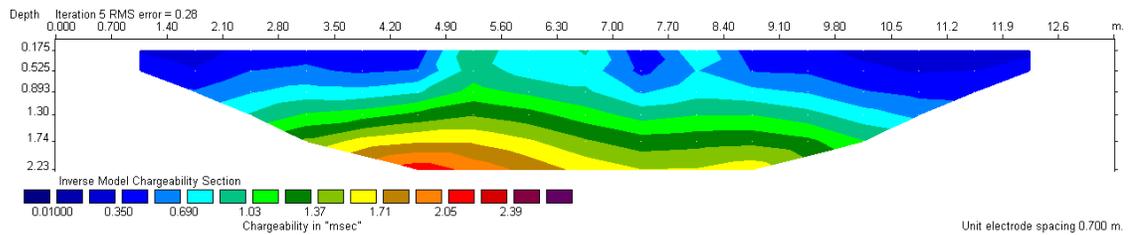
30- 08- 2007



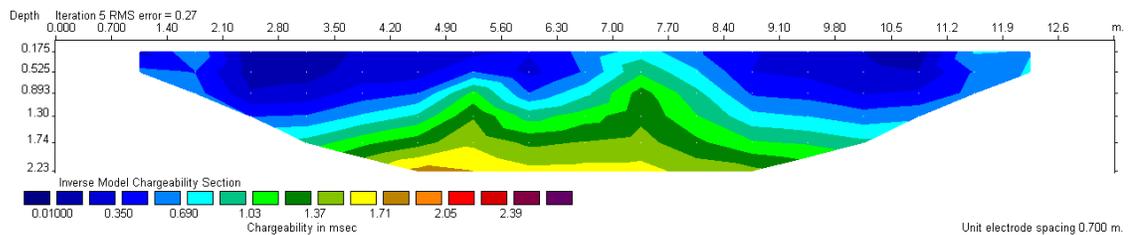
16- 11- 2007



14- 12- 2007

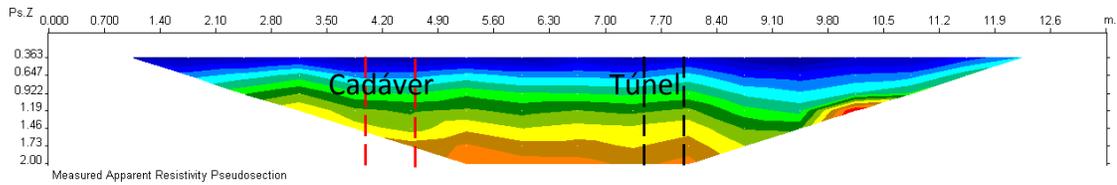


29- 12- 2008

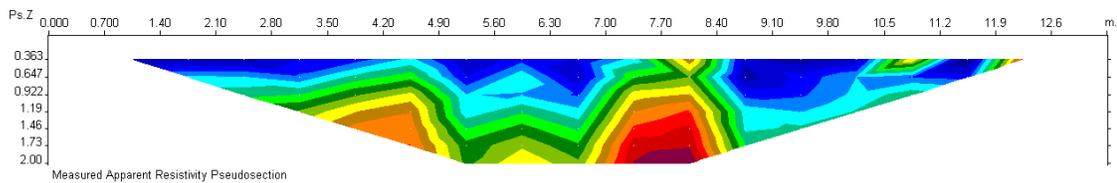


**ANEXO D- PSEUDO-SEÇÕES DE RESISTIVIDADE APARENTE MEDIDA**

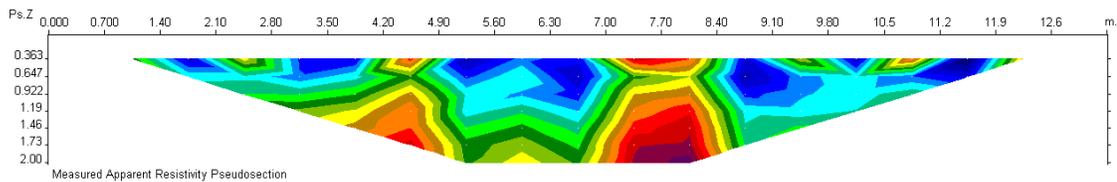
30- 08- 2007



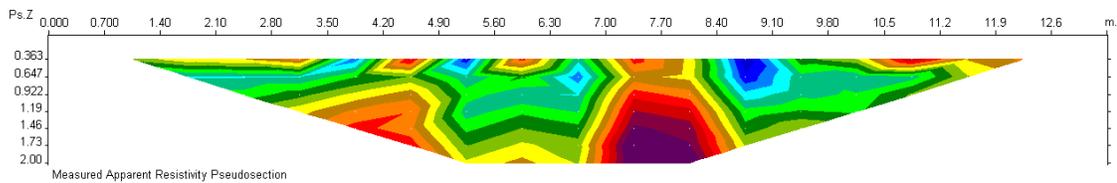
16- 11- 2007



14- 12- 2007

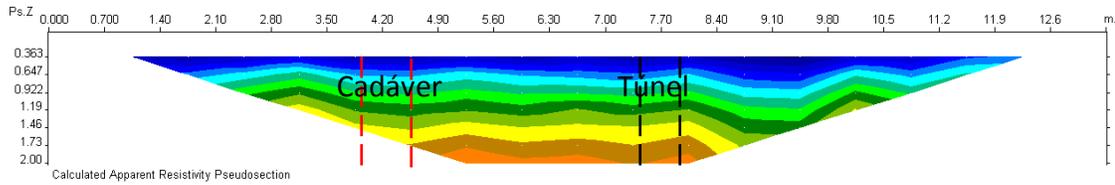


29- 12- 2008

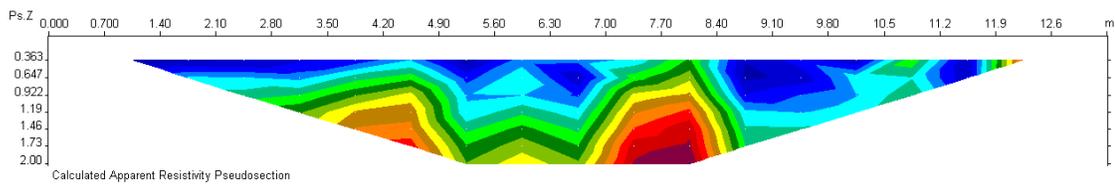


**ANEXO E- PSEUDO-SEÇÕES DE RESISTIVIDADE APARENTE CALCULADA**

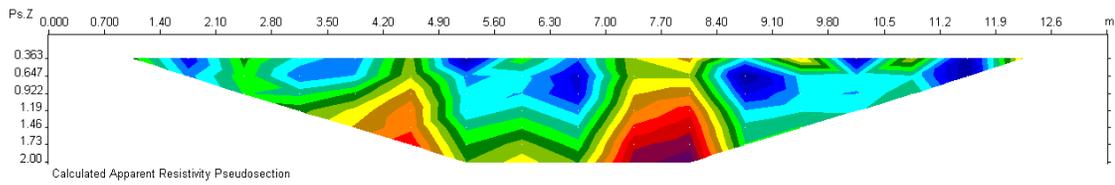
30- 08- 2007



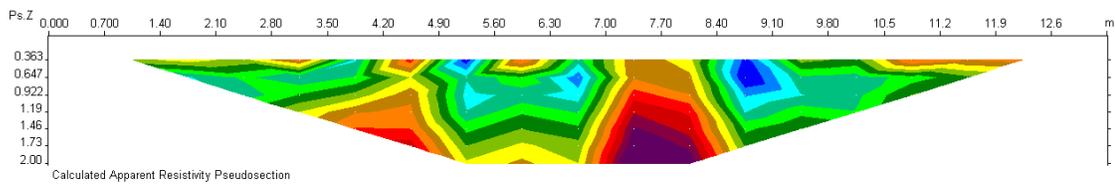
16- 11- 2007



14- 12- 2007

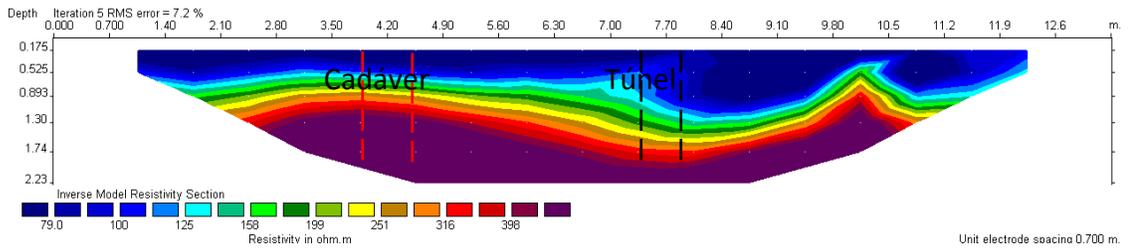


29- 12- 2008

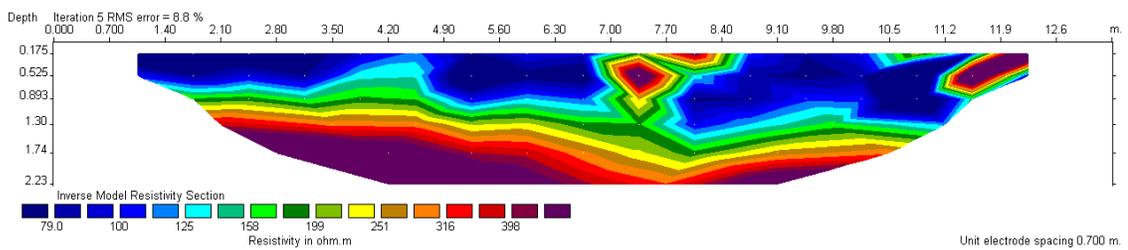


## ANEXO F- MODELOS FÍSICOS OBTIDOS COM A INVERSÃO DAS PSEUDO-SEÇÕES DE RESISTIVIDADE APARENTE MEDIDA

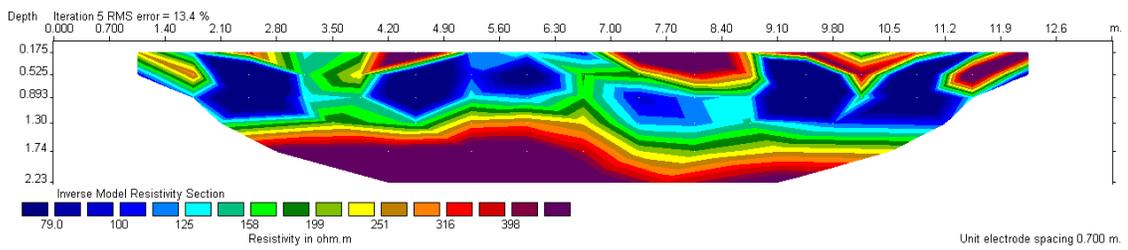
30- 08- 2007



16- 11- 2007



14- 12- 2007



29- 12- 2008

