



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

ANDERSON A. SANTIAGO DA COSTA

**RESISTIVIDADE, POTENCIAL ESPONTÂNEO E RADIOMETRIA APLICADOS
A INVESTIGAÇÕES AMBIENTAL E FORENSE
NO CAMPO DE TESTES DO CEMITÉRIO DO TAPANÃ (BELÉM-PA)**

**BELÉM-PA
2008**

ANDERSON A. SANTIAGO DA COSTA

**RESISTIVIDADE, POTENCIAL ESPONTÂNEO E RADIOMETRIA APLICADOS
A INVESTIGAÇÕES AMBIENTAL E FORENSE
NO CAMPO DE TESTES DO CEMITÉRIO DO TAPANÃ (BELÉM-PA)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geofísica
do Instituto de Geociências da
Universidade Federal do Pará, em
cumprimento às exigências para a
obtenção de grau de bacharel em
Geofísica.

Orientadora: Lúcia Maria da Costa e
Silva.

**BELÉM-PARÁ
2008**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Costa, Anderson Antonio Santiago da

C837r Resistividade, potencial espontâneo e radiometria aplicados a investigações ambiental e forense no campo de testes do cemitério do Tapanã (Belém/Pa). / Anderson Antonio Santiago da Costa;. -2009

41 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Segundo Semestre de 2008.

Orientadora: Lúcia Maria da Costa e Silva

1. Geofísica ambiental. 2. Geofísica forense. 3. Campo de testes. 4. Resistividade. 5. Potencial espontâneo. 6. Radiometria. I.Universidade Federal do Pará. II.Silva, Lúcia Maria da Costa e, orient. III. Título.

CDD 20º ed.:558.113

ANDERSON A. SANTIAGO DA COSTA

**RESISTIVIDADE, POTENCIAL ESPONTÂNEO E RADIOMETRIA APLICADOS
A INVESTIGAÇÕES AMBIENTAL E FORENSE
NO CAMPO DE TESTES DO CEMITÉRIO DO TAPANÃ (BELÉM-PA)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geofísica
do Instituto de Geociências da
Universidade Federal do Pará, em
cumprimento às exigências para a
obtenção de grau de bacharel em
Geofísica.

Data de aprovação: __/ __/ __

Conceito: _____

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Lúcia M. da Costa e Silva-Orientadora

Prof. Mestre Nélcio R. Medeiros da Fonseca-
Membro

Prof. Dr. José Gouvêa Luiz-Membro

**BELÉM-PARÁ
2008**

Às minhas mães Maria, Assunção e
Eliana.

AGRADECIMENTOS

A construção deste trabalho não seria possível sem a colaboração de inúmeras pessoas, amigos, colegas e professores. A todos eles ofereço meus sinceros agradecimentos, em especial aos que seguem.

À Prof^a Lúcia Maria da Costa e Silva, pela paciência, dedicação e orientação neste trabalho. Sem ela nada disso teria sido possível.

Ao Doutor em Geofísica Welitom Rodrigues Borges, pela ajuda com o software Res2DInv (Geotomo Software) e explicações sobre processamento de dados de eletrorresistividade. Além disso, pela oportunidade de estágio junto à empresa Geopesquisa Investigações Geológicas Ltda.

À Geopesquisa Investigações Geológicas Ltda pelo empréstimo do software RES2DINV para o melhoramento dos dados utilizados neste trabalho.

A Sra. Meyre Esther Mendes Chagas, diretora do Departamento de Necrópoles da Prefeitura Municipal de Belém (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 estudo.

Aos colegas da Pós-Graduação em Geofísica, Clístenes Catete e Waldemir Nascimento, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas da Graduação em Geofísica, Allex Cardoso e Danusa Souza, pelo apoio durante os levantamentos geofísicos e na confecção desta monografia.

Ao Instituto de Geociências (IG), por oferecer um espaço físico estruturado e toda parte operacional, sendo necessário destacar o apoio técnico no campo por parte do funcionário do mesmo instituto, Paulo Magalhães.

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

Aos amigos Clara, Danusa, Eduardo, Elyston, Juliany e Paula, pela amizade e apoio nesses quatro anos de graduação.

Finalmente, agradeço a Deus e a minha família, pelo apoio incondicional durante toda a minha jornada acadêmica.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”

Mahatma Gandhi

RESUMO

Em continuidade aos estudos da UFPA em cemitérios, implantou-se no Cemitério do Tapanã em 2007 um campo de testes controlados. Três alvos foram dispostos sob um perfil: um corpo humano, um túnel e uma caixa com material simulando armas militares. O objetivo deste trabalho foi investigar as respostas dos métodos geofísicos eletrorresistividade, potencial espontâneo e radiometria à decomposição ao longo do tempo de modo a subsidiar investigações ambientais sobre a assinatura da pluma de contaminação do necrochorume. Além disso, sendo os três alvos também materiais de investigações policiais, buscou-se analisar a aplicabilidade dos referidos métodos dentro da geofísica forense. Os resultados obtidos com eletrorresistividade identificaram o solo revolvido. Os resultados com potencial espontâneo mostraram o aumento da voltagem sobre o cadáver. A radiometria mostrou que cadáver e túnel aumentam o background. Os resultados aqui mostrados evidenciam que os métodos usados neste trabalho possuem potencial para os trabalhos ambientais em cemitérios e forenses, na seguinte ordem: eletrorresistividade, potencial espontâneo e radiometria.

Palavras-chave: geofísica ambiental, geofísica forense, campo de testes, resistividade, potencial espontâneo, radiometria.

ABSTRACT

In continuity to the studies of the UFPA in cemeteries, a site for controlled tests was implanted in the cemetery of the Tapanã in 2007. Three targets were buried under a profile: a human body, a tunnel and a box with material simulating military weapons. The objective was to investigate the answers of the geophysical methods electrorresistivity, spontaneous potential and radiometry to the body decomposition throughout the time in order to subsidize ambient inquiries on the signature of the plume of contamination of the necroleachate. Moreover, being the three also material targets of police inquiries, we searched the applicability of those methods in forensic geophysics. The results gotten with electrorresistivity allowed to identify the ground dug. The results with spontaneous potential showed an increase in voltage on the corpse. Radiometry showed that the corpse and the tunnel increased the background. The results shown here evidence that the used methods have potential for environmental studies in cemeteries and forensic investigation in the following order: electrorresistivity, spontaneous potential and radiometry.

Key-words: environmental Geophysics, forense Geophysics, test site, resistivity, self potential, radiometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do cemitério do Tapanã (CODEM, 1996).....	15
Figura 2: Precipitações pluviométricas acumuladas (INMET, 2007).	16
Figura 3: Variação topográfica em relação ao nível do mar (CODEM, 1996).....	16
Figura 4: Esquema de tomografia Wenner-Schlumberger com quatro níveis de investigação.....	18
Figura 5: Alvos introduzidos no FORAMB. À direita, o cadáver humano. À esquerda, os dois caixotes.....	22
Figura 6: Caracterização do perfil de testes controlados.....	23
Figura 7: Levantamento de resistividade.....	24
Figura 8: Levantamento radiométrico com cintilômetro.....	25
Figura 9: Perfis de resistividade aparente. a) perfil de agosto, antes da colocação dos alvos, b) perfis após a colocação dos alvos: b) outubro, c) novembro e d) dezembro.	27
Figura 10: Resíduos das medidas brutas de resistividade aparente. a) Outubro, b) Novembro e c) Dezembro.....	28
Figura 11: Pseudo-seções de resistividade aparente medida e calculada e a seção invertida de resistividade referentes a: a) agosto, b) outubro, c) novembro e d) dezembro.	30
Figura 12: Perfis de SP. a) Perfil de 30/08/2007, antes da colocação dos alvos. b) Perfil de 19/10/2007. c) Perfil de 16/11/2007 e d) Perfil de 14/12/2007	33
Figura 13: Resíduos das medidas brutas de SP. a) Outubro, b) Novembro e c) Dezembro.....	34
Figura 14: Perfis SP filtrados com média móvel de 3 pontos. a) Agosto, b) Outubro, c) Novembro e d) Dezembro.....	35
Figura 15: Perfis de SP filtrados com média móvel de 5 pontos: a) Agosto, b) Outubro, c) Novembro e d) Dezembro	36
Figura 16: Perfis brutos de RAD. a) Perfil de 30/08/2007, b) Perfil de 19/10/2007, c) Perfil de 16/11/2007 e d) Perfil de 14/12/2007	38
Figura 17: Resíduos das medidas de Radiometria. a) Outubro, b) Novembro e c) Dezembro.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	ÁREA SOB ESTUDO	14
2.1	LOCALIZAÇÃO E ACESSO.....	14
2.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	14
3	BASE TEÓRICA DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS.....	17
3.1	ELETORRESISTIVIDADE.....	17
3.2	POTENCIAL ESPONTÂNEO.....	18
3.3	RADIOMETRIA	20
4	PREPARAÇÃO DA ÁREA DE TESTES CONTROLADOS.....	21
5	LEVANTAMENTO GEOFÍSICO	23
5.1	ELETORRESISTIVIDADE.....	23
5.2	POTENCIAL ESPONTÂNEO.....	25
5.3	RADIOMETRIA	25
6	TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	26
6.1	ELETORRESISTIVIDADE.....	26
6.2	POTENCIAL ESPONTÂNEO.....	32
6.3	RADIOMETRIA	37
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

As fontes de contaminação da água e do solo que mais têm destaque são os resíduos urbanos (lixo comum e hospitalar e esgoto), derramamentos de combustíveis e rejeitos de mineração. Os cemitérios, no entanto, representam uma fonte potencial de impacto ambiental, até mais perigosa que o lixo hospitalar.

Bello, Sadalla Neto e Santos Filho (2002), em seus estudos sobre a implantação de cemitério em Belém do Pará, destacaram que, apesar de existir uma legislação concernente a tal implantação, ainda é comum encontrar cemitérios instalados em áreas impróprias, assim como encontrar população consumindo água a partir de poços rasos em suas adjacências.

Fonseca (1994), em seu Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Pará (UFPA), analisou a água coletada em três cemitérios de Belém, constatando a contaminação por necrochorume em dois, um deles, o do Bengui.

Carvalho Jr. (1997), através dos métodos geofísicos potencial espontâneo e eletrorresistividade, obteve a direção e o sentido de fluxo da água subterrânea sob o cemitério do Bengui, ajudando a localizar pontos de amostragens de água que comprovaram a contaminação da mesma; na ocasião, essa água era usada por moradores das imediações. Este trabalho produziu grande impacto: motivou o fechamento definitivo do cemitério e a elaboração da lei para a Implantação Ambientalmente Correta de Cemitérios Horizontais, que passou a ser válida para todo o Pará (Lei Estadual nº 5.887 de 09.05.95, artigo 93 e 94 e Resolução 335, de 3 de abril de 2003 do CONAMA).

Damasceno (2000), por sua vez, através do método geofísico da Eletrorresistividade, mostrou os locais do Cemitério do Tapanã em Belém com as maiores chances de ter o aquífero livre sendo contaminado.

Dando continuidade aos estudos realizados pela Universidade Federal do Pará em cemitérios (CARVALHO Jr. 1997, DAMASCENO 2000, além de outros), a Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências, com o apoio da Prefeitura de Belém através da Secretaria Municipal de Administração (SEMAD) e do Instituto Médico Legal Renato Chaves (IML), implantou em 2007, no Cemitério do Tapanã, um campo de testes controlados de 60 m² (15 m x 4 m) com o objetivo de investigar

a resposta dos métodos geofísicos ao processo de putrefação ao longo do tempo, de modo a subsidiar investigações ambientais sobre a assinatura da pluma de contaminação do necrochorume.

A dificuldade do IML em fornecer corpos para o campo de testes, já que apenas indigentes sem substâncias preservativas e sem envolvimento criminal poderiam ser considerados, por um lado, e, por outro lado, a perda de líquidos pelos cadáveres na necropsia, e ainda no seu congelamento, levaram ao re-planejamento do campo de testes, adaptando-o também para o estudo de interesse policial (Geofísica Forense). No lugar dos três corpos inicialmente previstos, foi usado apenas um, mas foram enterrados dois outros alvos de interesse policial e o campo de testes passou a ser conhecido como FORAMB (Campo de Testes Geofísicos Controlados Forense e Ambiental). Assim, o FORAMB entrou em atividade com testes geofísicos aplicados sobre um corpo humano, um caixote de madeira vazio simulando um túnel de 2,24 m de comprimento e um caixote de madeira preenchido com simuladores de armas militares.

Em sua aplicação forense, a Geofísica é quase sempre realizada com o Radar de Penetração do Solo (ou GPR, do inglês Ground Penetrating Radar). Daniels (2004) cita em seu livro (Ground Penetrating Radar) inúmeros casos históricos em que a Justiça recorreu a grupos especializados de investigação forense buscando auxílio para suas perícias. Entre os métodos mais eficientes está o GPR, devido a sua elevada resolução bem como ao seu caráter não destrutivo e não invasivo, ou seja, o levantamento GPR não destrói e sequer afeta o alvo e a área sob investigação, portanto, não altera a cena do crime.

Vários outros métodos geofísicos são, também, não destrutivos e não invasivos ou muito pouco invasivos e permitem a obtenção de dados a baixo custo e com rapidez. Por outro lado, o radar pode, em situações muito especiais, por exemplo, na presença de argila e umidade, comuns em Belém, gerar respostas insatisfatórias, o que suscita o interesse em conhecer as respostas de outros métodos aos alvos enterrados.

Este trabalho abrange, portanto, os resultados obtidos com os seguintes métodos: eletrorresistividade, potencial espontâneo e radiometria. Os dois primeiros foram aplicados em diversos trabalhos sobre a contaminação por cemitérios, mas sempre de modo indireto. Nada foi encontrado sobre a aplicação desses métodos na

Geofísica Forense, devido ao fato de que essa é uma área relativamente nova e, especialmente, à resolução desses métodos ser inferior à esperada para a análise de cenas de crime. Nascimento et al. (2008) dizem que as medidas radiométricas são sobremaneira influenciadas pelos primeiros 0,45 m do solo; a remoção do solo, realizada quando é enterrado um alvo, promove a redução de minerais que contém isótopos emissores de radiação gama, mas não é conhecido se, em ambiente de baixo background radioativo, caso de Belém, essa redução de emissores de gama pode ser percebida nas medições.

No capítulo 2, é descrita a área do Cemitério do Tapanã. No capítulo 3, é apresentada a fundamentação teórica dos métodos aplicados. No capítulo 4, os levantamentos geofísicos realizados no FORAMB são descritos detalhadamente. No capítulo 5, é mostrada a preparação da área de testes controlados. No capítulo 6, o tratamento e interpretação geofísicos são apresentados. Por fim, o capítulo 7 reúne as conclusões e recomendações finais.

2 **ÁREA SOB ESTUDO**

2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O cemitério parque do Tapanã está localizado no km 5 da rodovia do Tapanã, entre as rodovias Augusto Montenegro e Arthur Bernardes, na Região Metropolitana de Belém, em uma área de 12,92 ha.

A Figura 1 mostra a localização desse cemitério municipal rotativo, que está em operação desde setembro de 2006, em substituição ao cemitério do Bengui. Na Figura 1, a área de teste a leste aparece marcada com a letra **T**.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O clima predominante no Tapanã é quente e úmido, sendo que o regime pluviométrico é caracterizado por períodos fortemente chuvosos entre novembro e maio e pouco chuvosos entre junho e outubro. A temperatura média é de 26°C e a precipitação pluviométrica em 2007 em torno de 306 mm, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A Figura 2 apresenta as precipitações pluviométricas acumuladas para 1, 2, 5, 10, 15 e 20 dias antes de cada data de aquisição (INMET; 2007).

A Figura 3 ilustra a topografia dentro do cemitério em relação ao nível do mar (CODEM, 1996). A base do mapa mostra suas coordenadas geográficas em UTM.

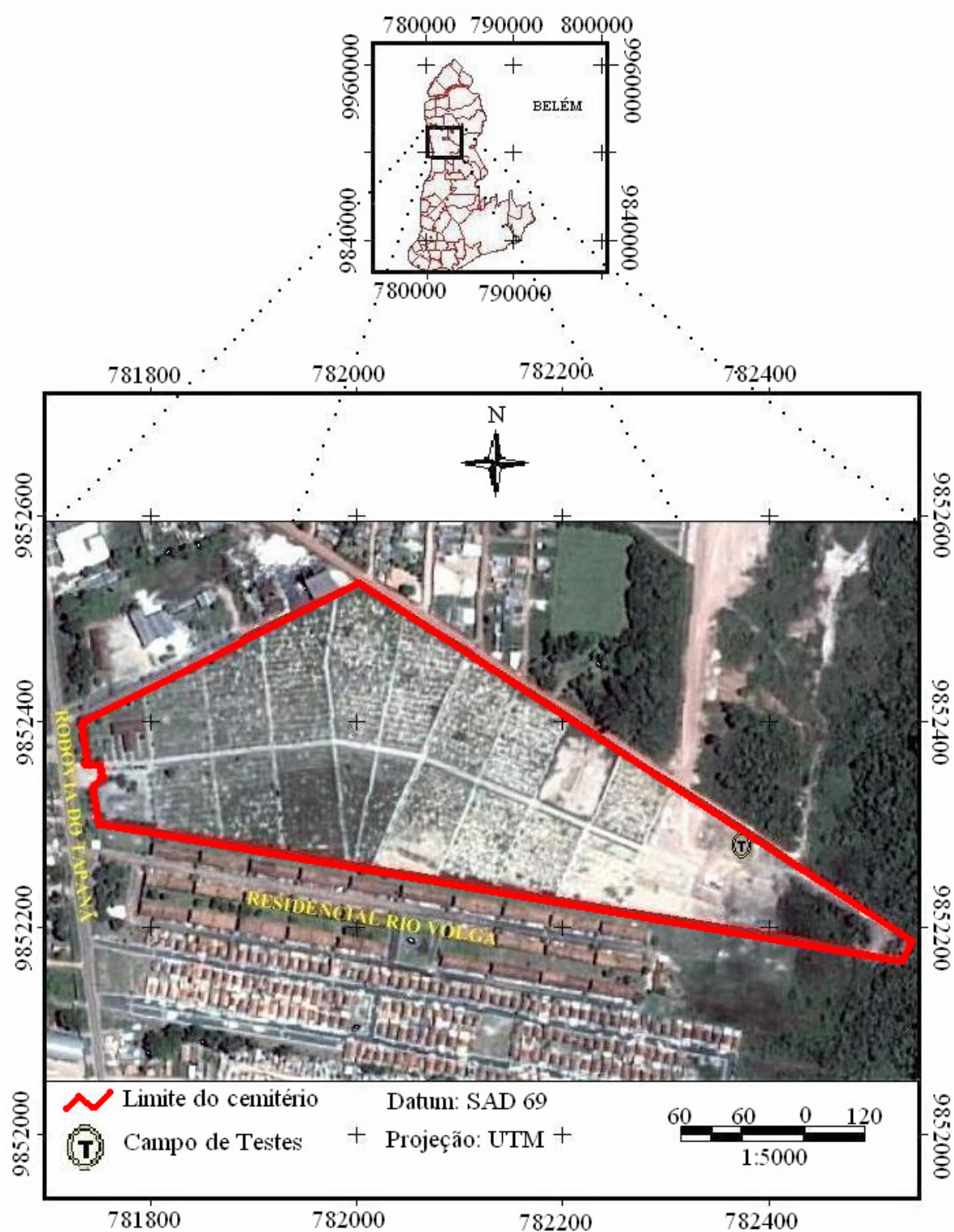


Figura 1: Localização do cemitério do Tapanã (CODEM, 1996).

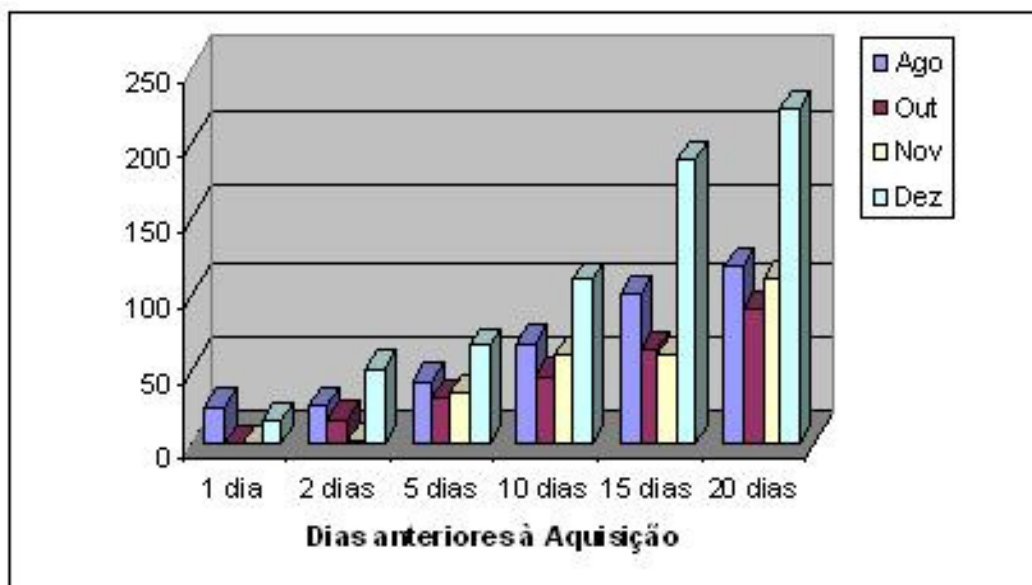


Figura 2: Precipitações pluviométricas acumuladas (INMET, 2007).

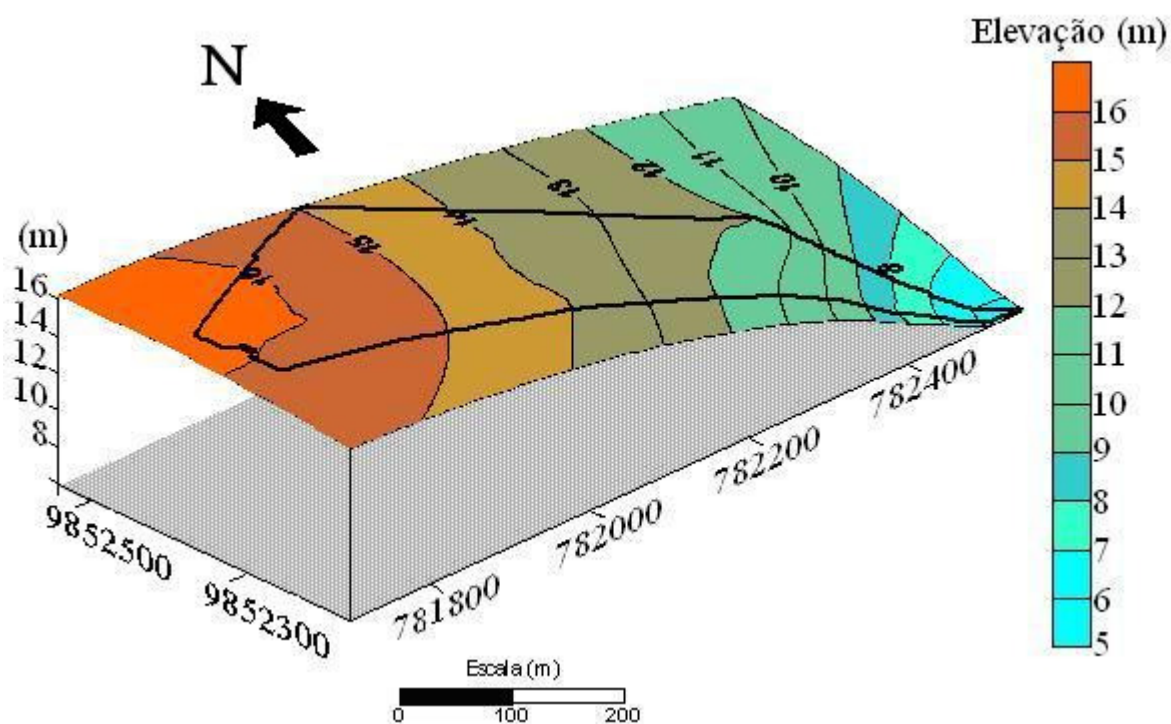


Figura 3: Variação topográfica em relação ao nível do mar (CODEM, 1996).

Segundo Damasceno (2000), a litologia do cemitério compreende sedimentos do Terciário, topo do grupo Barreiras, e do Quaternário, sedimentos pós-Barreiras e aluviões. Localmente, para leste, observa-se a redução na escavabilidade devido à presença de Grês-do-Pará, geralmente recoberto por sedimentos areno-argilosos sotopostos a uma camada de aterro argilo-arenoso.

O nível hidrostático é cerca de 7 m a oeste (DAMASCENO, 2000), mas cai em direção a leste.

3 BASE TEÓRICA DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS

3.1 ELETORRESISTIVIDADE

A eletorresistividade é um método geofísico muito aplicado nas áreas de hidrogeologia, geotecnia e engenharia ambiental.

O método consiste na aplicação de uma corrente elétrica no solo através de dois eletrodos metálicos. A corrente trafega pelos diferentes estratos e corpos enterrados, gerando uma diferença de potencial que é medida entre dois outros eletrodos inseridos no terreno, fornecendo os valores de resistividade do subsolo (ORELLANA, 1982).

Os valores de resistividade elétrica medidos durante um levantamento de eletorresistividade sofrem influência de uma série de fatores como: natureza dos constituintes sólidos do solo, porosidade, grau de saturação, resistividade do fluido nos poros, temperatura, composição da camada catiônica dos argilo-minerais etc. (FUKUE et al., 1999).

No FORAMB, a introdução dos três alvos deve ter modificado a resistividade do ambiente pela remoção do solo e introdução de sais existentes no corpo, ar no caso do túnel e metais no caso da caixa de armaria.

A aquisição de dados de eletorresistividade pode ser obtida por meio das seguintes técnicas: caminhamento elétrico (investigação lateral), sondagem elétrica (investigação vertical) e tomografia (lateral e vertical). Os eletrodos, por sua vez, podem ser dispostos segundo uma grande variedade de arranjos, como Wenner, Schlumberger, Wenner-Schlumberger e dipolo-dipolo.

Neste trabalho foi realizada uma tomografia com o arranjo Wenner-Schlumberger investigando sete níveis. A Figura 4 apresenta um esquema da

tomografia com o arranjo Wenner-Schlumberger até o quarto nível. Os eletrodos de corrente são designados com as letras A e B, os de potencial, com M e N. O espaçamento entre os eletrodos é a . A razão entre as distâncias AM e MN gera um valor chamado de fator de separação dos eletrodos (n), que indica o número de níveis investigados (GEOTOMO SOFTWARE 2007).

O primeiro nível de investigação é obtido com os eletrodos de medida de potencial dispostos entre os eletrodos de inserção de corrente, percorrendo todo o perfil como no arranjo Wenner, ou seja, com igual espaçamento para cada par de eletrodos contíguos. Em seguida, o procedimento é repetido com maiores espaçamentos entre os eletrodos de corrente e potencial, 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 que a distância entre os eletrodos de potencial. A resistividade aparente é obtida por meio de:

$$\rho_a = \pi n (n + 1) a \frac{\Delta V}{I},$$

em que ΔV é a variação de potencial medida pelos eletrodos de potencial e I , a corrente injetada.

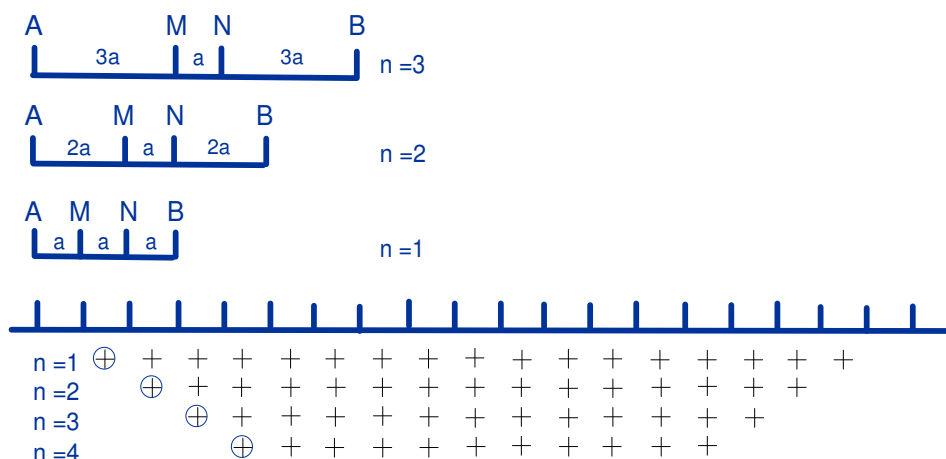


Figura 4: Esquema de tomografia Wenner-Schlumberger com quatro níveis de investigação.

3.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO

O método de potencial espontâneo é um método de fonte natural, uma vez que não precisa de nenhum circuito de emissão de corrente elétrica (TELFORD et

al., 1976). A água subterrânea é o agente mais importante no mecanismo de geração de SP. Os potenciais podem estar associados à presença de corpos metálicos, fluxo de eletrólitos nos poros das rochas, contatos entre rochas de diferentes resistividades elétricas, atividade bioelétrica de materiais orgânicos, gradientes térmico e de pressão nos fluidos de subsuperfície (ORELLANA, 1982, GALLAS, 2000).

Entre os fenômenos descritos na literatura, o potencial gerado pelo fluxo de eletrólitos nos poros das rochas, conhecido como eletrofiltração, é o mais importante para a investigação ambiental. Para a investigação forense, todos os potenciais auxiliam a destacar modificações da subsuperfície, mas o potencial associado à presença de corpos metálicos, que é conhecido como potencial de mineralização, destaca-se quando o interesse recai na investigação de materiais metálicos.

A eletrofiltração está associada à passagem de um eletrólito através de uma membrana porosa e a conseqüente produção de uma diferença de potencial entre dois pontos distintos da membrana. Considerando-se a porosidade do substrato como uma rede de capilares por onde percolam as águas de subsuperfície, então o comportamento do substrato pode ser visto como o de uma membrana. Os ânions são adsorvidos pelas paredes dos capilares e irão atrair os cátions, estabelecendo-se desta maneira uma dupla camada elétrica. Os ânions permanecem fixos enquanto os cátions são transportados através dos capilares pelo fluxo do fluido ali presente, criando-se uma concentração destes últimos na saída. Surge então uma diferença de potencial entre os pontos inicial e final do percurso, que pode ser medida durante uma campanha com o método de SP (ORELLANA, 1982, GALLAS, 2000).

O potencial de mineralização, por sua vez, é gerado pela diferença de potencial de oxi-redução entre as soluções próximas às diferentes porções de um alvo condutivo. O alvo não sofre nem oxidação e nem redução, mas fornece elétrons na sua porção superior para os íons oxidados presentes nas soluções assim como recebe elétrons na sua porção inferior dos íons reduzidos das soluções ou, em outras palavras, serve como condutor dos elétrons (TELFORD et al., 1976, ORELLANA, 1982).

O método de SP tem uma grande vantagem em relação aos outros métodos geofísicos: a sua simplicidade, tanto instrumental como operacional, além do baixo custo.

3.3 RADIOMETRIA

A radiometria baseia-se na detecção da tênue radiação nuclear emitida pelos materiais geológicos presentes no terreno (TELFORD et al., 1976).

O fenômeno de radioatividade é um processo natural que átomos instáveis desenvolvem durante um certo intervalo de tempo, no sentido de chegarem a um estado de estabilidade nuclear. Para tanto os átomos desintegram-se naturalmente alterando a razão entre a quantidade de prótons e a quantidade de nêutrons no núcleo (BECEGATO, 2005). Durante esse processo há de forma aleatória a emissão de radiações eletromagnéticas e partículas, sendo as principais: (i) radiações gama (γ), (ii) partículas alfa (α) e (iii) partículas Beta (β).

Na prospecção radiométrica geralmente se mede a radiação gama natural do terreno. Isso porque, devido a radiação gama não possuir massa e ter a velocidade da luz (3×10^8 m/s), ela possui maior poder de penetração e menor capacidade de ionização do que as partículas (100 vezes menos que as partículas β e 10.000 vezes menos que as partículas α) (MINTY, 1997).

A radiação gama natural é emitida durante o decaimento radioativo de elementos usualmente presentes em todos os solos e rochas, ainda que em quantidades variáveis. As principais fontes de radiação são o ^{40}K e as séries do ^{238}U e ^{232}Th . Na crosta terrestre, esses isótopos de K, U e Th ocorrem em abundâncias variáveis respectivamente em torno de 3%, 3 ppm e 12 ppm. O ^{40}K corresponde a 0,012% do potássio total, o ^{238}U , a 99,3% do urânio total e o ^{232}Th , a 100% do tório total. Cerca de 90% dos raios gama emanam da camada superficial do solo ou da rocha, até profundidades da ordem de 45 cm a 50 cm (NASCIMENTO et al. 2008).

No contexto em que se propõe aplicar a radiometria no FORAMB, espera-se que a concentração de radionuclídeos presentes no solo seja modificada pela introdução dos três alvos; o cadáver pode, inclusive, conter substâncias radioativas (potássio e outras).

4 PREPARAÇÃO DA ÁREA DE TESTES CONTROLADOS

Áreas de testes controlados já foram construídas em diversos países (Tabela 1). A primeira parte de instalação de uma área de testes consiste na procura de local com poucos ruídos culturais e geológicos, o que no caso do FORAMB foi realizado com o auxílio do radar de penetração do solo (GPR) em 13 de agosto de 2007. Em seguida, os alvos são enterrados.

A área selecionada para o FORAMB é rica em argila e fragmentos de Grês-do-Pará e está a um desnível de aproximadamente 7 m da parte mais alta do cemitério. Sua localização é mostrada na Figura 1.

Em seguida, partiu-se para a preparação do perfil de testes, enterrando-se três alvos no dia 5 de outubro de 2007.

O primeiro alvo enterrado trata-se de um cadáver humano do sexo masculino, com 55 kg e 1,60 m de altura, já com menos líquido em sua constituição por conta da autópsia e congelamento. O cadáver estava envolto em um plástico negro.

O segundo alvo inserido foi o caixote vazio de madeira simulando o túnel, com dimensões de 0,5 m X 0,5 m X 2,2 m.

Por fim, enterrou-se a caixa de madeira contendo ferros com peso e volume equivalentes aos de uma escopeta real, uma granada e um revolver, separados em três níveis por papelão.

Os alvos enterrados são mostrados na Figura 5, conjuntamente com suas dimensões. A Figura 6 apresenta o perfil e a localização dos alvos em posições transversais ao perfil.

Tabela 1 – Alguns campos de teste geofísicos no Brasil e no mundo
(modificada de Borges 2007).

Local	Responsável
Brasil, Campus da UFRA	Universidade Federal do Pará
Brasil, Cemitério do Tapanã	Universidade Federal do Pará
Brasil, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas	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

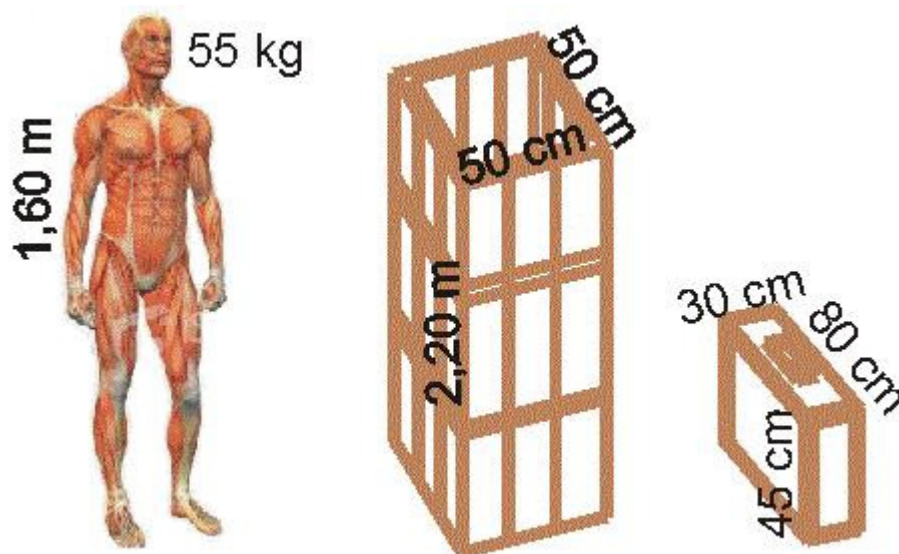


Figura 5: Alvos introduzidos no FORAMB. À direita, o cadáver humano. À esquerda, os dois caixotes.

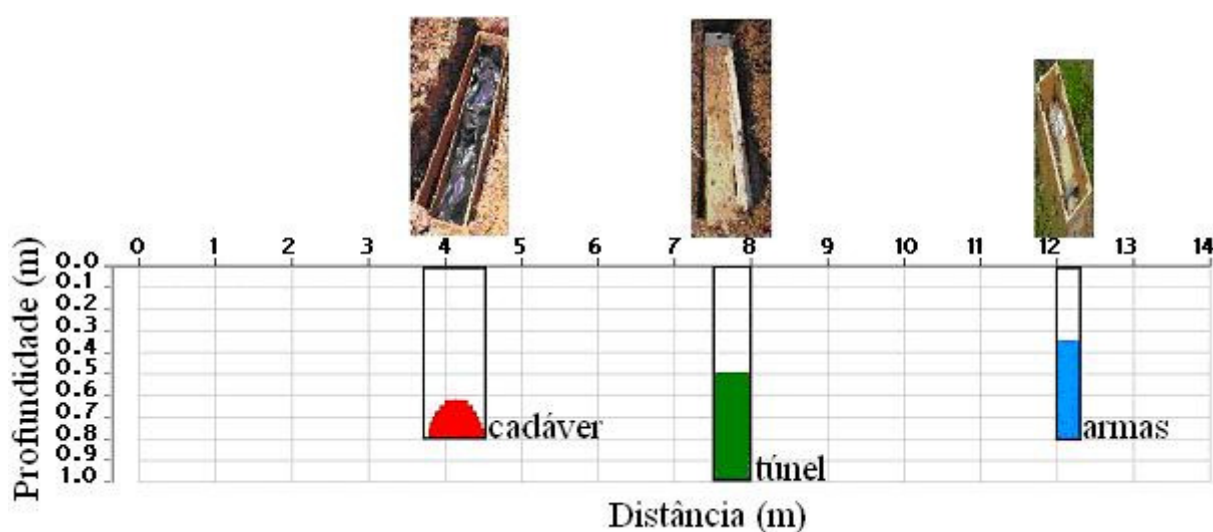


Figura 6: Caracterização do perfil de testes controlados.

5 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

A Tabela 2 mostra as datas de aquisição das medidas geofísicas, seguida da descrição dos levantamentos com os diferentes métodos.

Tabela 2: Datas de Aquisições Geofísicas

Data	Método Geofísico
30/08/2007	ER, RAD, SP – Background
19/10/2007	ER, RAD, SP
16/11/2007	ER, RAD, SP
14/12/2007	ER, RAD, SP

5.1 ELETORRESISTIVIDADE

O levantamento de resistividade foi realizado com um Imageador de resistividade e polarização induzida modelo IRPI-1000 da GEOTEST (Brasil) de 1KW e 20 canais. Foram utilizados 20 eletrodos de cobre espaçados de 0,7 m ao longo de 13,3 m para a investigação de sete níveis sob o perfil. O equipamento permitiu a verificação automática da resistência de contato entre os eletrodos com o

solo e anulou eletronicamente o potencial espontâneo de eletrodo. A Figura 7 mostra o levantamento de resistividade elétrica com o arranjo Wenner-Schlumberger.

Vale frisar que a aquisição no mês de outubro foi feita com apenas 18 eletrodos, por conta de uma falha técnica. Conseqüentemente, o perfil referente ao nível 3 será menor.



Figura 7: Levantamento de resistividade.

5.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO

No levantamento de potencial espontâneo no campo de testes do cemitério do Tapanã, foram usados eletrodos não polarizáveis de cobre em solução saturada de sulfato de cobre e um voltímetro de elevada impedância de entrada (da ordem de 10^{14} ohm) construído pela UFPA.

O levantamento de potencial espontâneo foi realizado em estações espaçadas de 1 m, totalizando 14 estações. Um eletrodo de referência foi colocado a 8 m de distância da primeira estação do perfil de testes, enquanto o segundo eletrodo percorreu as estações realizando as medidas.

5.3 RADIOMETRIA

As medidas de radiometria foram tomadas com um espectrômetro de contagem total de radiação gama, modelo TV 5 da McPHAR GEOPHYSICS, em estações espaçadas de 1 m. O equipamento foi colocado em contato com o chão como mostra a Figura 8 para se obter medidas pontuais.



Figura 8: Levantamento radiométrico com cintilômetro

6 TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Neste capítulo, os resultados são reunidos em figuras nas quais a posição do corpo é assinalada com linha vermelha, o túnel é mostrado com linha verde e a posição da caixa, com armas com linha azul.

6.1 ELETORRESISTIVIDADE

Primeiramente, são mostrados os resultados para o terceiro nível, o qual simula o caminhamento elétrico que seria obtido com um equipamento tradicional de eletorresistividade, para se analisar a sua utilidade na detecção dos alvos considerados. Em seguida, são mostrados os resultados para os quatro primeiros níveis.

A Figura 9 reúne os perfis brutos de resistividade aparente obtidos antes da colocação dos alvos e nos três meses subsequentes referentes ao nível 3. No eixo das abscissas foram lançadas as posições dos pontos de medidas e no eixo das ordenadas, o logaritmo da resistividade aparente medida.

Já a Figura 10, mostra o resíduo entre as medidas obtidas na presença dos alvos e as medidas do background, para auxiliar na interpretação dos perfis brutos de resistividade aparente obtidos para o nível 3.

As medidas obtidas para o nível três não passam sobre a caixa com armas, como mostram as Figuras 9 e 10, porque o equipamento opera com 20 eletrodos que foram espaçados de 0,7 m, com exceção do mês de outubro em que foram utilizados apenas 18 eletrodos.

O perfil obtido antes da introdução dos alvos na subsuperfície, apresentado no topo da Figura 9, mostra valores de resistividade aparente muito próximos.

A introdução dos corpos sob o perfil de testes adicionou ao subsolo espaços macroscópicos contendo ar, bem como uma porosidade secundária (posterior ao equilíbrio dos sedimentos ali presentes). Os espaços macroscópicos mais a porosidade secundária podem, por sua vez, gerar uma porosidade terciária (porosidade originada pela porosidade secundária e conseqüente aumento da entrada de água no sistema). Em conseqüência, os perfis de resistividade aparente não são mais monótonos como o perfil obtido antes da colocação dos alvos.

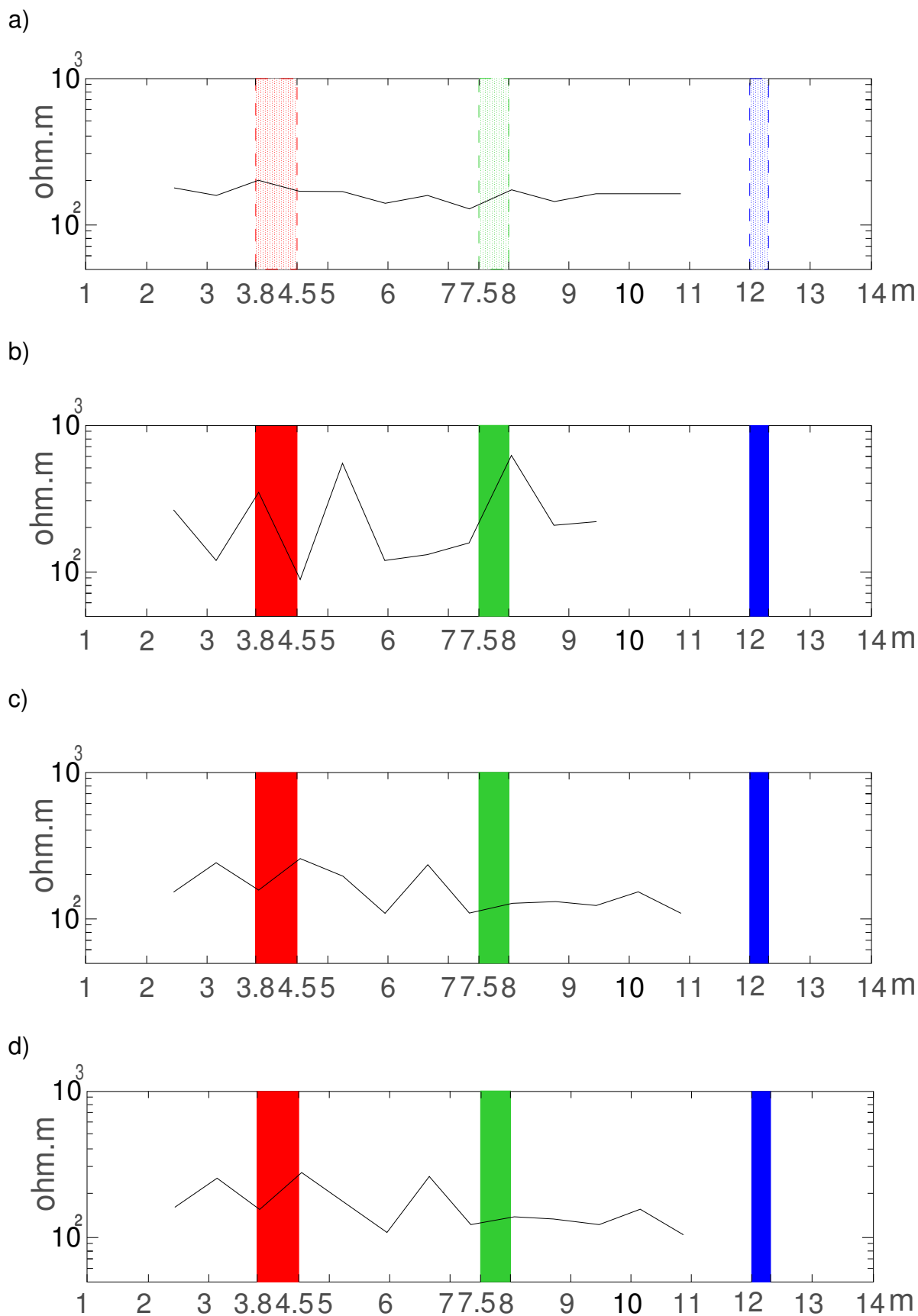


Figura 9: Perfis de resistividade aparente. a) perfil de agosto, antes da colocação dos alvos, b) perfis após a colocação dos alvos: b) outubro, c) novembro e d) dezembro.

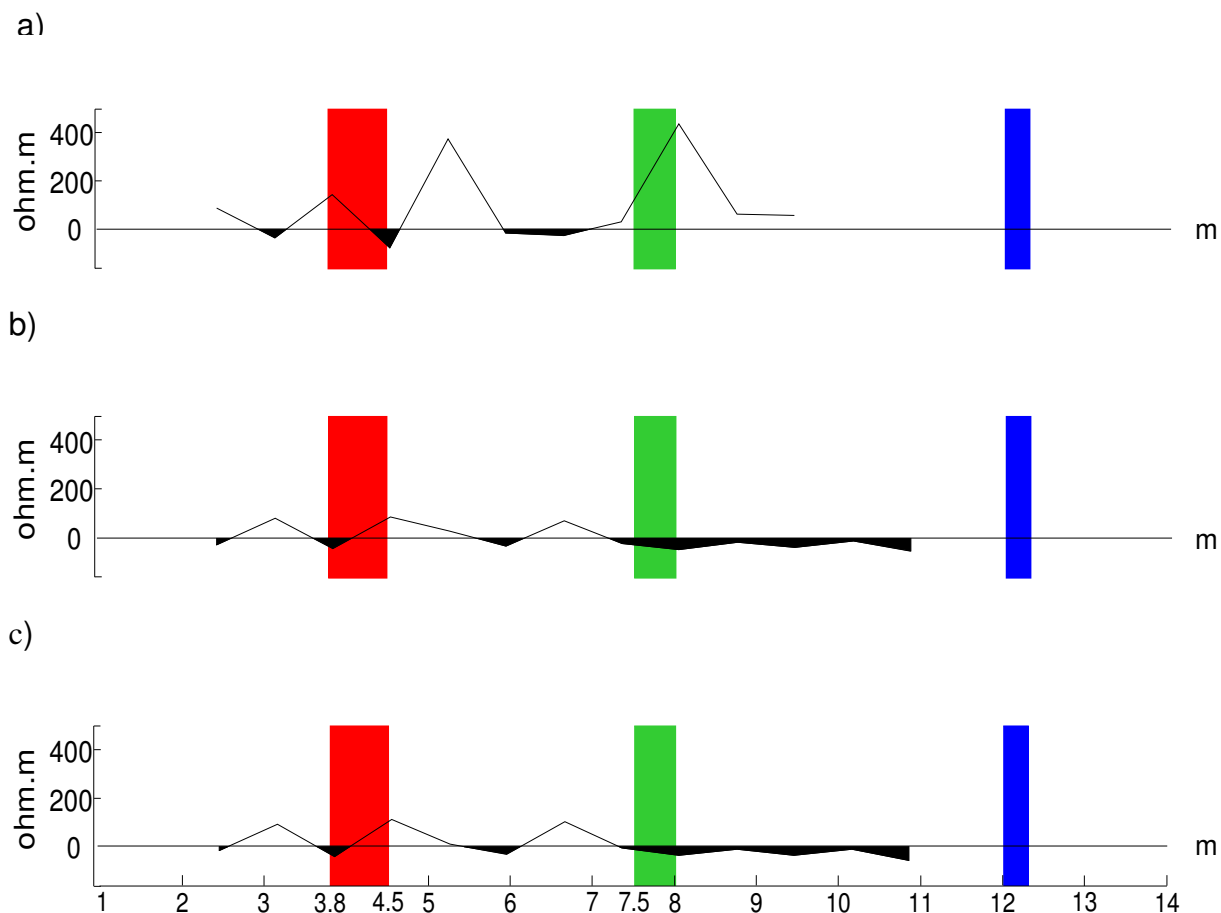
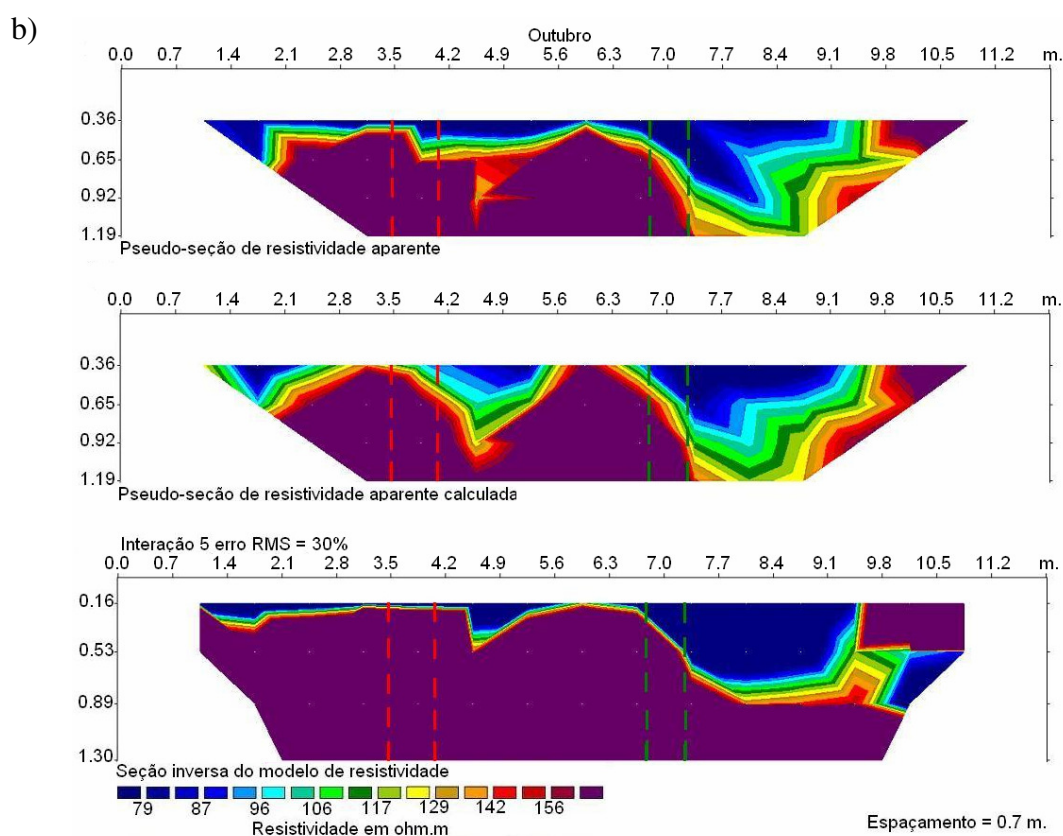
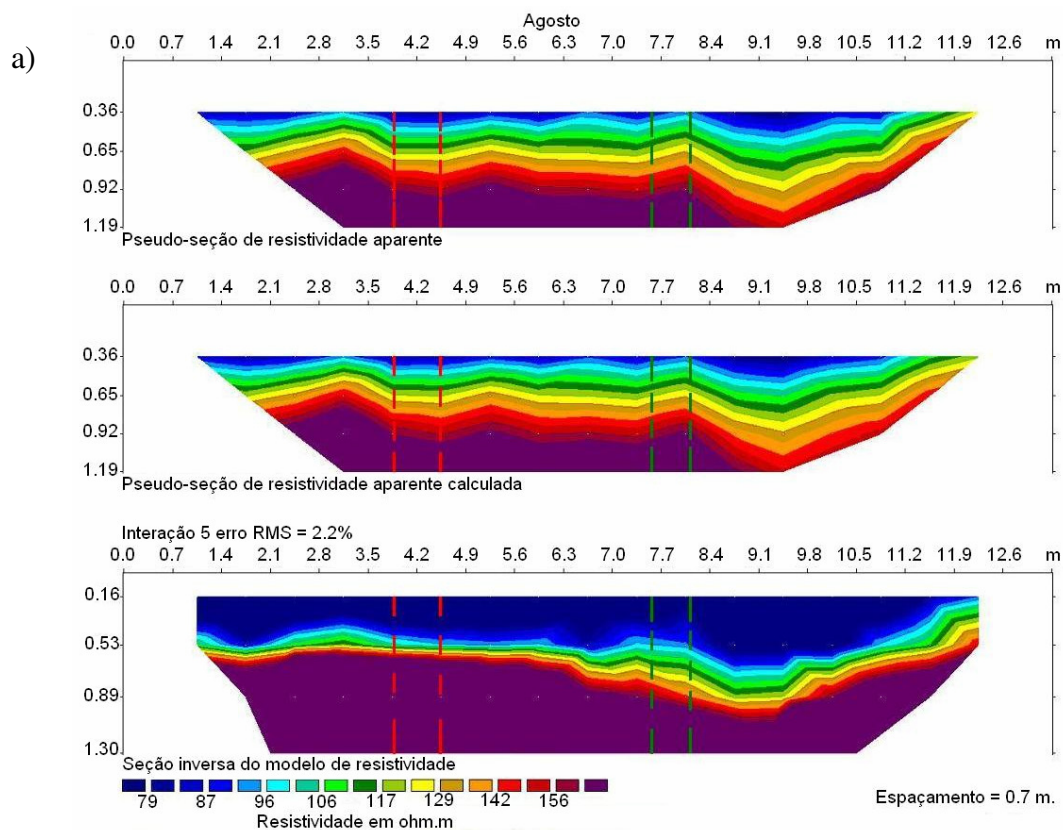


Figura 10: Resíduos das medidas brutas de resistividade aparente. a) Outubro, b) Novembro e c) Dezembro.

A observação minuciosa dos perfis da Figura 9 mostra que o efeito da porosidade terciária é mais significativo no perfil obtido logo após a introdução dos alvos na subsuperfície (outubro) em que aparecem picos de resistividade aparente não necessariamente coincidentes com a posição dos alvos. Tais picos podem ser reflexo do percurso da corrente em subsuperfície não ter sido afetada apenas pela introdução dos corpos mas também pelo bloqueio do eletrólito pela Grês-do-Pará.

Nos perfis de resíduo reunidos na Figura 10, pode-se verificar que a introdução dos alvos gera nos três últimos meses um aumento geral da resistividade aparente. Esse resultado foi também verificado por Nascimento (2008) com método geofísico Slingram operando na condição de baixo número de indução (LIN), ainda que investigando mais profundamente.

A Figura 11 apresenta as pseudo-seções de resistividade aparente medida e de resistividade aparente calculada para a seção invertida de resistividade que aparece abaixo das mesmas. Foram considerados os quatro primeiros níveis de cada mês de aquisição.



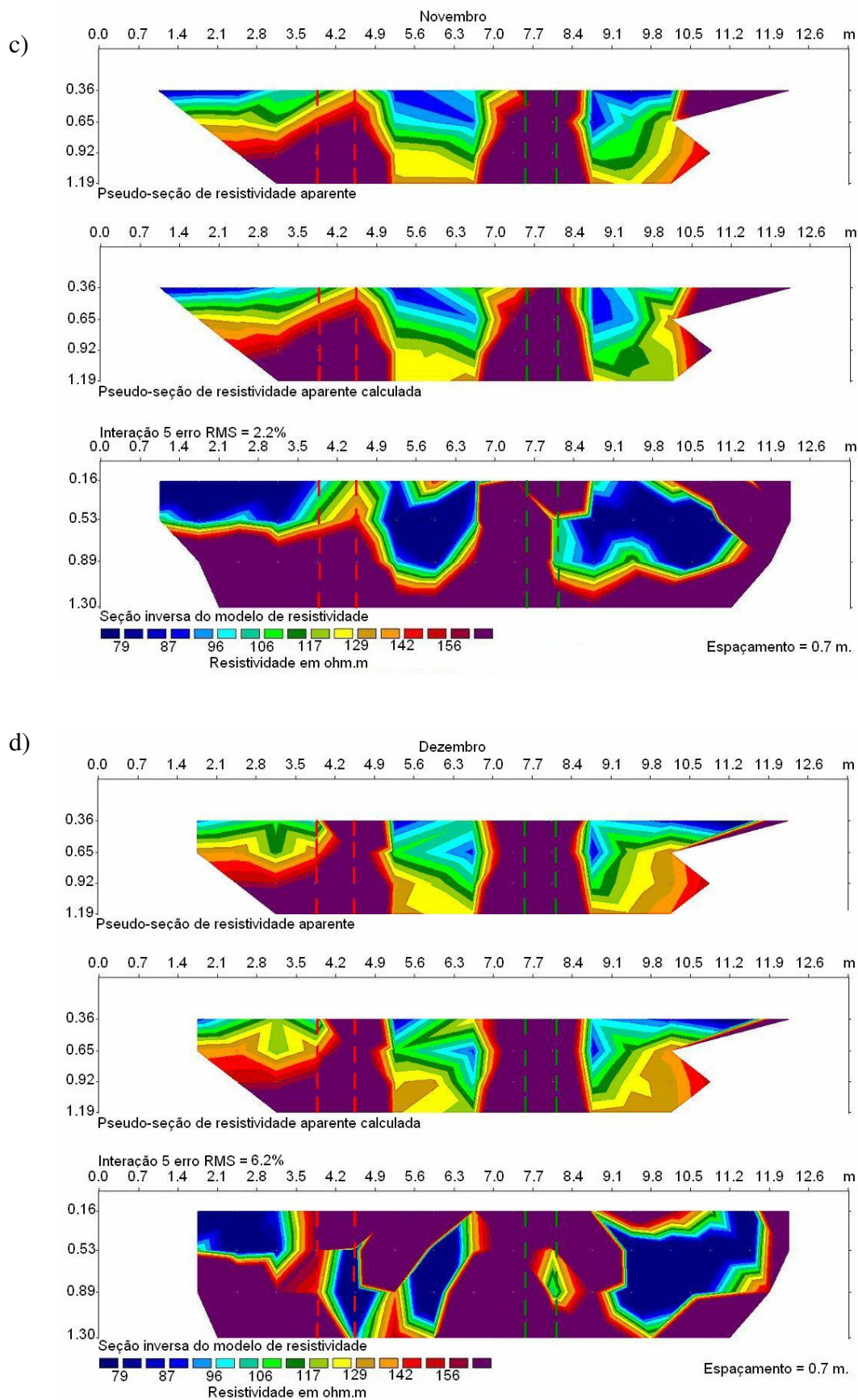


Figura 11: Pseudo-seções de resistividade aparente medida e calculada e a seção invertida de resistividade referentes a: a) agosto, b) outubro, c) novembro e d) dezembro.

A inversão foi realizada com o programa RES2DINV da Geotomo Software, que utiliza o método da suavidade (GEOTOMO 2007). Foram feitas cinco iterações e obtidos os ajustes (erro médio quadrático-RMS) de 2,2% para a seção de resistividade aparente obtida em agosto, 30% para a obtida em outubro, 2,2% para a seção de novembro e 6,2% para a seção de dezembro.

A Figura 11b mostra o acréscimo na resistividade aparente devido à introdução dos alvos de maneira consistente com os resíduos da Figura 10a. Nesta interpretação, ênfase é dada na seção de resistividade aparente medida, já que a solução obtida com a inversão possui o maior erro no ajuste.

As Figuras 11c e 11d mostram a redução da resistividade após o mês de outubro, o que pode também ser observado nos resíduos das Figuras 10b e 10c. É provável que a água introduzida no sistema com o início das chuvas tenha se misturado com os sais disponíveis, causando o aumento da condutividade.

Na Figura 11d, próximo ao corpo e próxima à caixa simuladora do túnel, a seção de resistividade obtida com a inversão sugere o aumento da condutividade, também perceptível nos perfis das Figuras 9c e 9d. A distribuição da resistividade aparente pode evidenciar a redução dos espaços macroscópicos como, por exemplo, o desmoronamento das paredes seja da cova bem como do túnel. O ajuste entre as medidas de resistividade aparente e a resistividade calculada é, contudo, baixo (RMS = 6,2%).

Alguns trabalhos, por exemplo, Barreira, Dinis e Figueiredo (2008) mostram indícios que o necrochorume seria responsável pelo aumento da condutividade subsuperficial. Silva & Souza (2008) não observaram essa tendência em clima amazônico, mas trabalharam com método de penetração maior (Slingram operando com baixo número de indução). Para a profundidade de investigação deste trabalho, contudo, é possível que a redução da resistividade seja também consequência da liberação do necrochorume, porque a quantidade de água das chuvas ainda é pequena (Figura 2).

6.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO

A Figura 12 mostra os perfis brutos de SP antes e depois da introdução dos alvos. No eixo das abscissas foram lançadas as posições dos pontos de medidas e no eixo das ordenadas, a voltagem medida. A Figura 13, por sua vez, mostra os resíduos de SP.

Como o perfil obtido antes da introdução dos alvos na subsuperfície, apresentado no topo da Figura 12, mostra voltagens com ruído, aplicou-se aos dados um filtro do tipo média móvel de três pontos (pesos 25-50-25) e cinco (pesos 10-20-40-20-10) pontos. A Figura 14 e a Figura 15 mostram os perfis filtrados. Os perfis obtidos com os alvos mostra quase sempre um menor background de SP, como pode ser visto principalmente na Figura 15, obtido com o filtro de cinco pontos. Muito provavelmente, assim como nos dados de resistividade aparente, a causa resida na modificação da porosidade do terreno.

O perfil construído com os dados brutos obtidos em outubro, logo após a introdução dos alvos, mostra as seguintes modificações principais em relação ao perfil sem os alvos: o pico negativo pré-existente em 4 m deixa de existir, mas aparece um pico negativo em 5 m e há uma redução geral do BG, que é bastante clara nos perfis filtrados das Figura 14 e Figura 15 bem como no resíduo mostrado na Figura 13.

As medidas do mês de dezembro seguem o mesmo comportamento das medidas do mês de outubro. As medidas do mês de novembro, contudo, seguem o comportamento das medidas obtidas em agosto. Esse comportamento pode significar um certo retorno do sistema às condições pré-sepultamento dos alvos, sendo modificadas novamente em dezembro pela introdução da água das chuvas no sistema.

O resíduo evidencia que a posição do cadáver é, em todos os meses, identificada por um aumento da voltagem. Como não se observa resposta análoga seja para o túnel, seja para a caixa de armaria, pode-se inferir que não é o aumento da porosidade a responsável direta pelo aumento da voltagem, pois esta ocorre também para os dois demais alvos, mas a presença do necrochorume e de sua carga de sais, introduzindo íons adicionais para a formação da camada fixa e arraste dos demais íons.

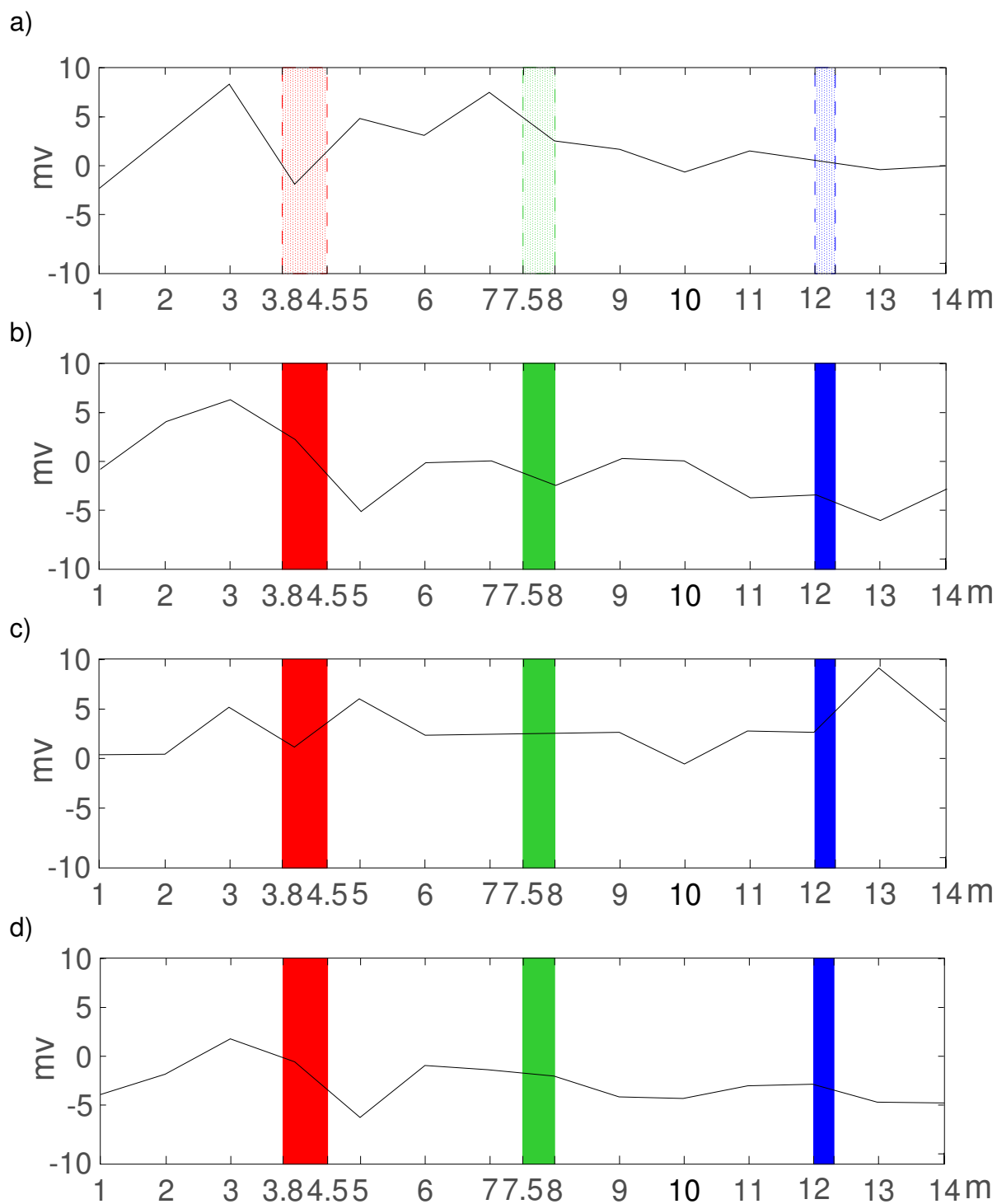


Figura 12: Perfis de SP. a) Perfil de 30/08/2007, antes da colocação dos alvos. b) Perfil de 19/10/2007. c) Perfil de 16/11/2007 e d) Perfil de 14/12/2007

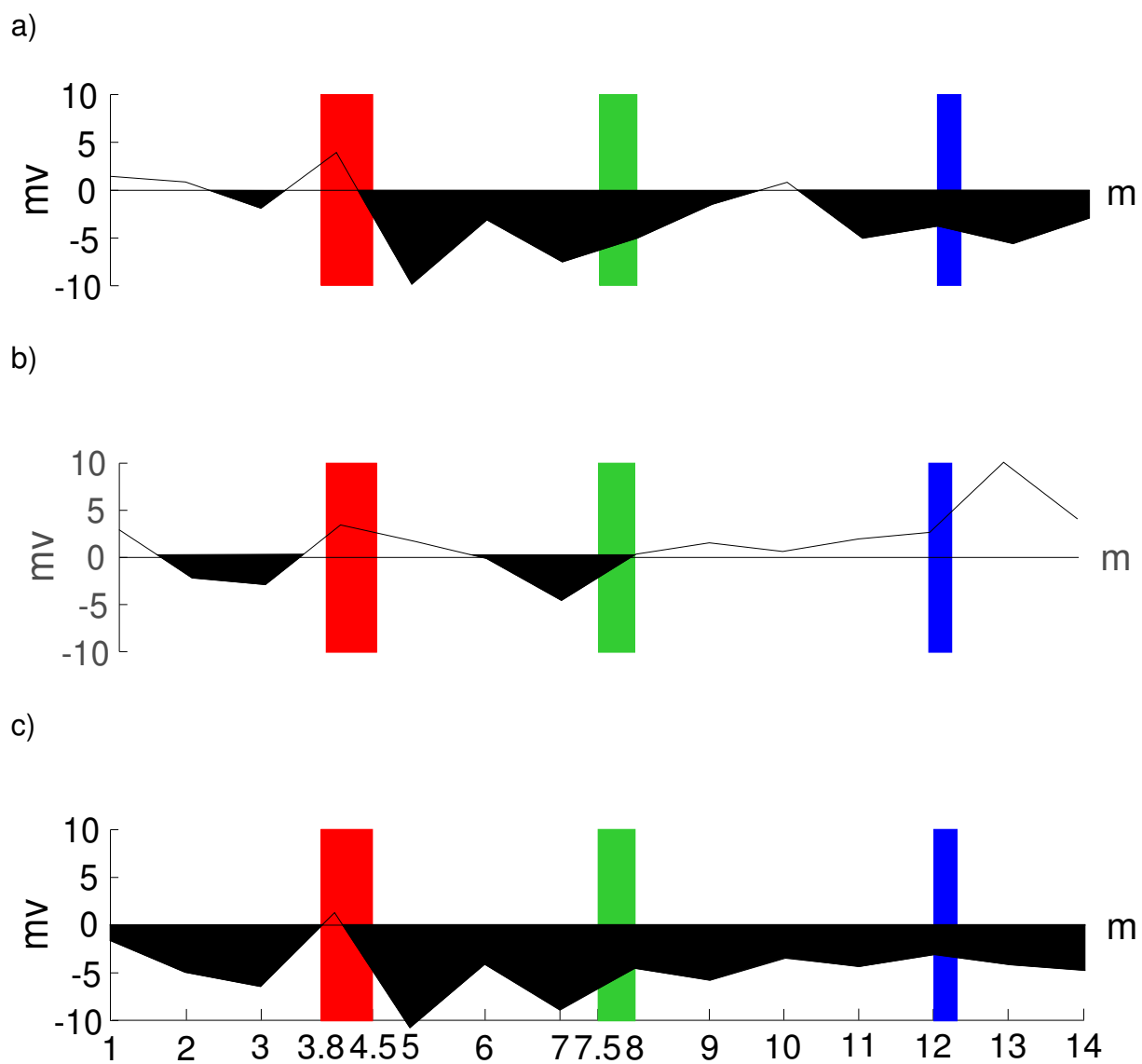
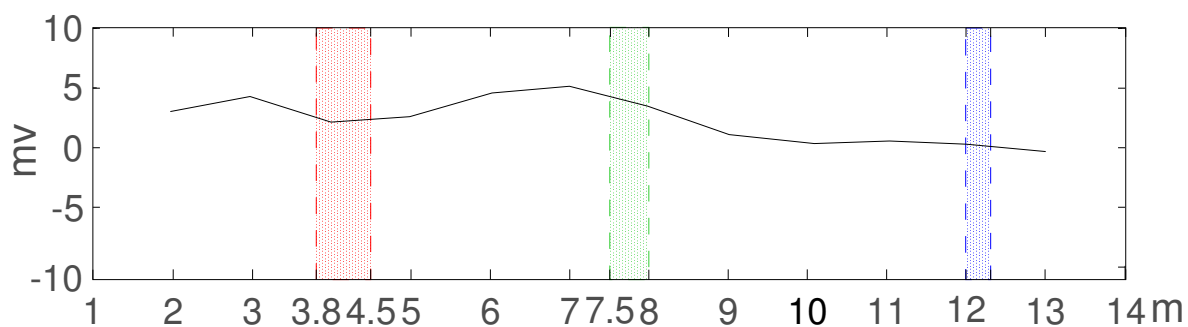
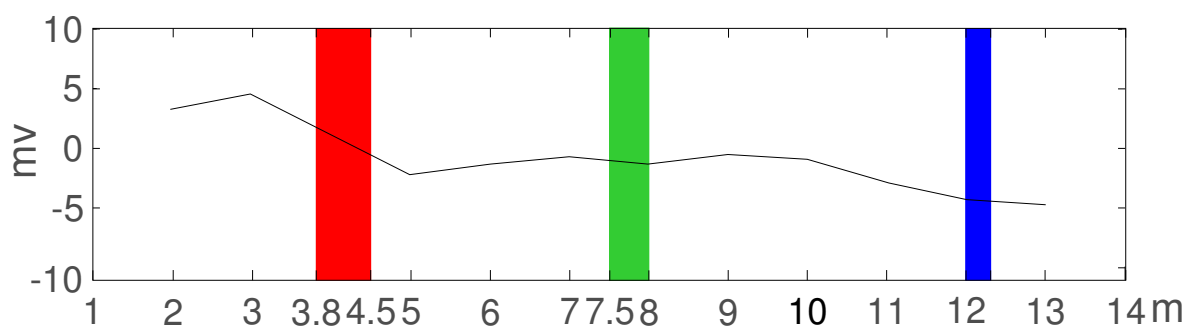


Figura 13: Resíduos das medidas brutas de SP. a) Outubro, b) Novembro e c) Dezembro.

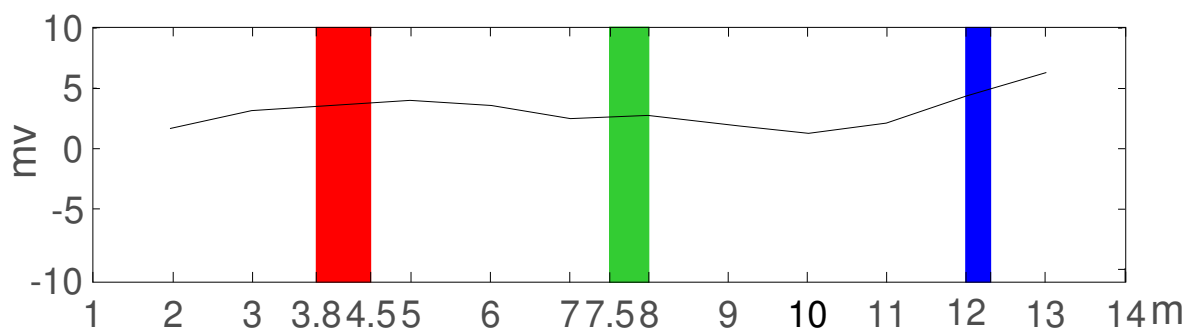
a)



b)



c)



d)

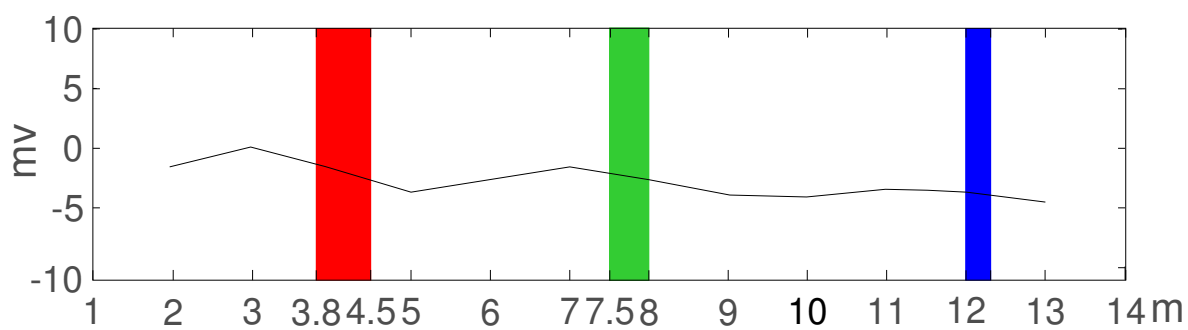


Figura 14: Perfis SP filtrados com média móvel de 3 pontos. a) Agosto, b) Outubro, c) Novembro e d) Dezembro.

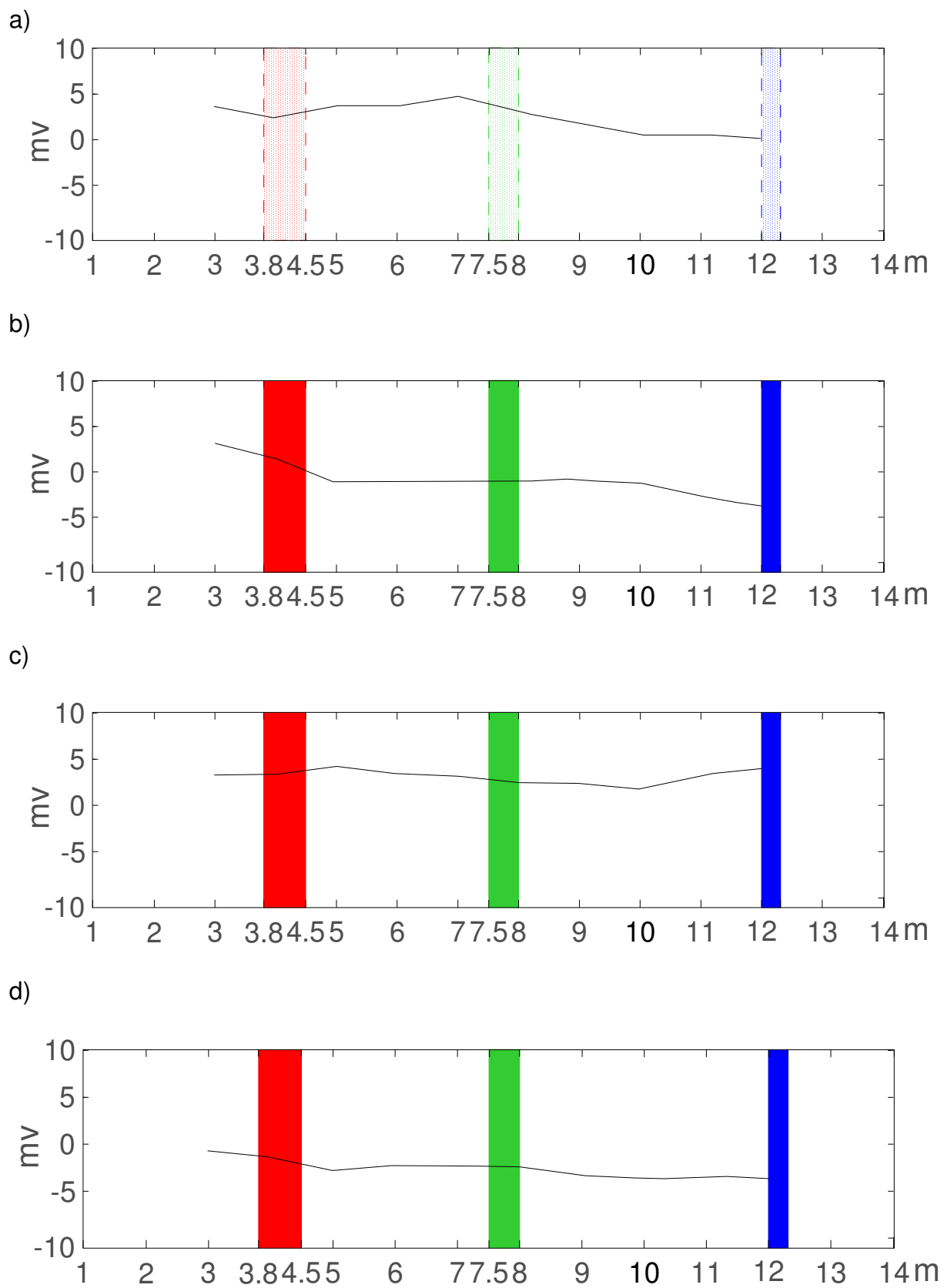


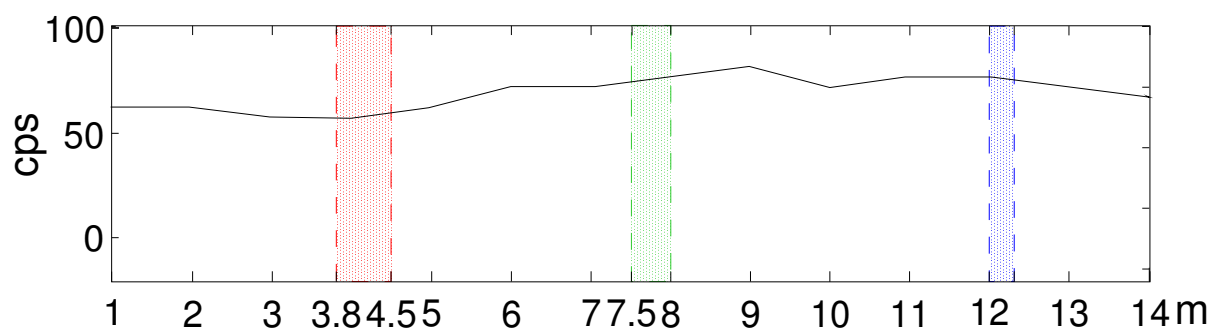
Figura 15: Perfis de SP filtrados com média móvel de 5 pontos: a) Agosto, b) Outubro, c) Novembro e d) Dezembro

6.3 RADIOMETRIA

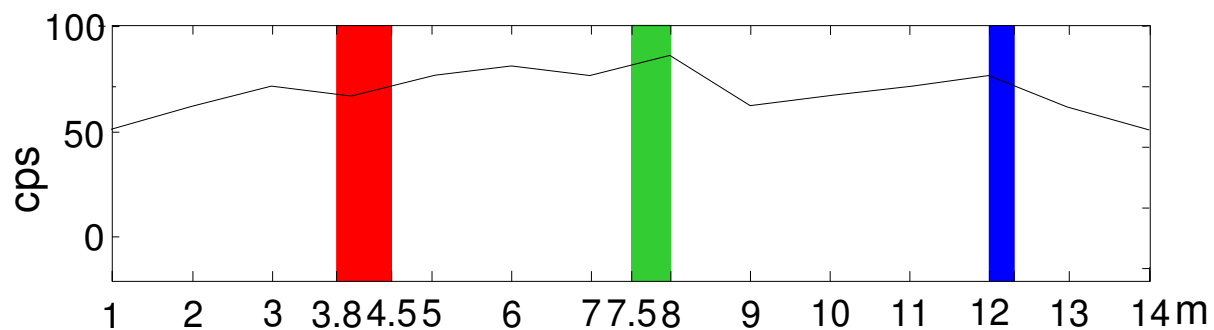
A Figura 16 mostra os perfis brutos de radiometria sem os alvos e nos três meses após o enterramento dos alvos. No eixo das abscissas foram lançadas as posições dos pontos de medidas e no eixo das ordenadas, a contagem de cintilações (pulsos) por segundo (cps). A Figura 17, por sua vez, mostra o resíduo entre as medidas obtidas com os alvos e as medidas obtidas sem os alvos.

Os perfis com as medidas brutas não apresentam correlação fácil entre medidas e alvos enterrados. Os perfis com os resíduos, contudo, mostram que o corpo e o túnel aumentaram as contagens provavelmente pelo aumento da porosidade volumétrica (e a conseqüente redução de barreiras materiais aos raios gama) ser superior ao da cavidade criada para a instalação da caixa de armaria. A caixa de armaria, em realidade, pode estar blindando a emissão gama, pois os perfis com os resíduos mostram para a posição da mesma a redução das contagens após a sua introdução. No mês de dezembro, as chuvas, ou seja, a entrada de blindagem aos raios gama, pode explicar o pico negativo próximo ao túnel (Figura 16d).

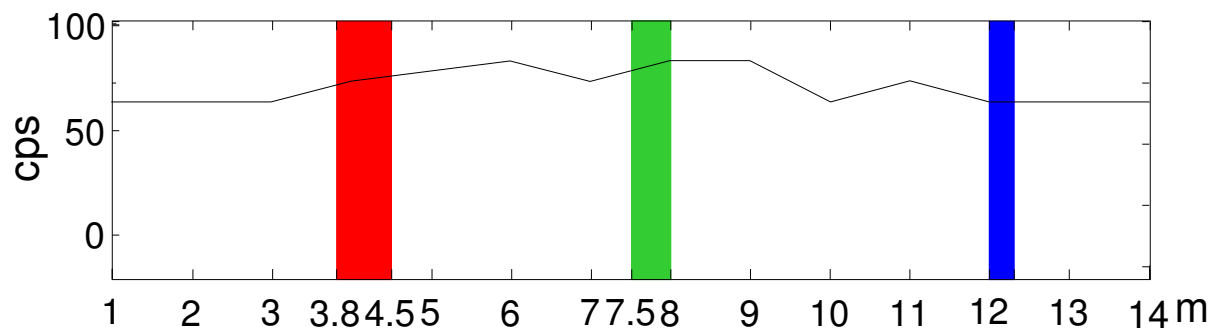
a)



b)



c)



d)

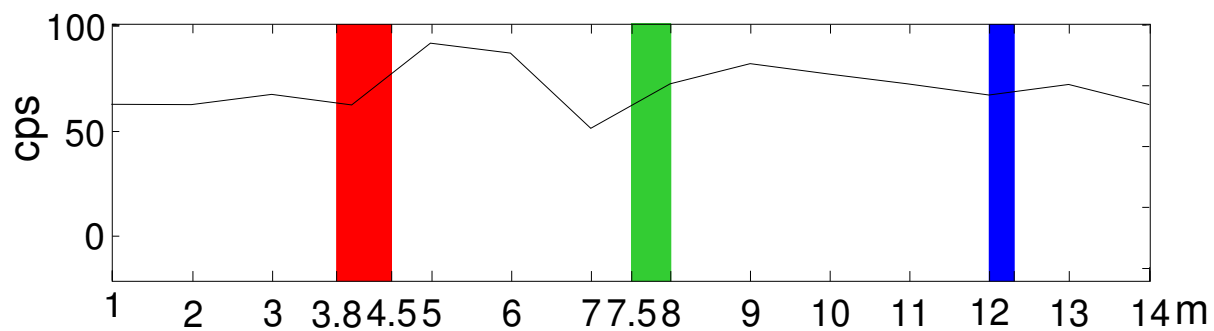
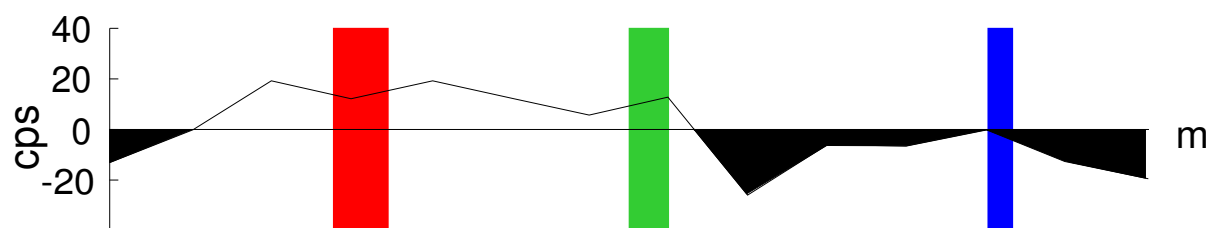
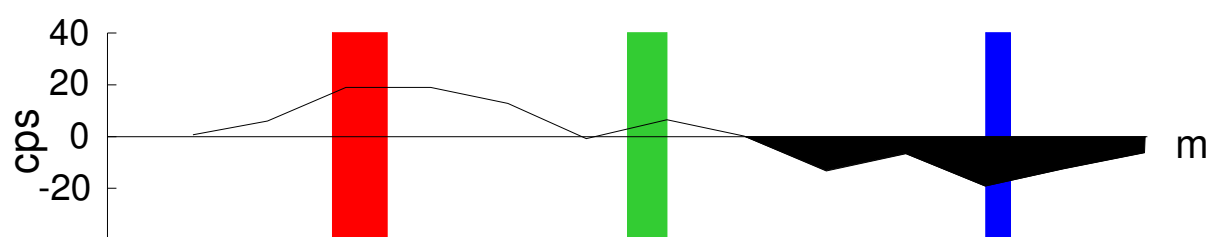


Figura 16: Perfis brutos de RAD. a) Perfil de 30/08/2007, b) Perfil de 19/10/2007, c) Perfil de 16/11/2007 e d) Perfil de 14/12/2007

a)



b)



c)

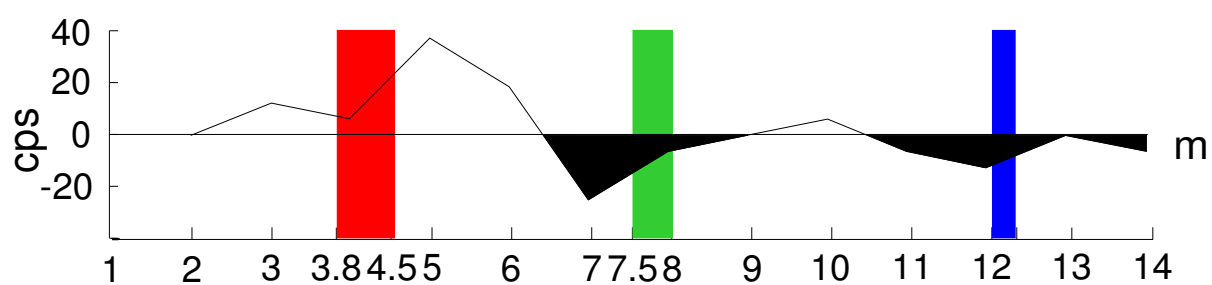


Figura 17: Resíduos das medidas de Radiometria. a) Outubro, b) Novembro e c) Dezembro.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos com o método da eletrorresistividade foram os mais satisfatórios. Eles mostraram que é fácil identificar solo trabalhado. Os resultados com o método do potencial espontâneo mostraram o aumento da voltagem sobre o cadáver. As medidas de radiometria mostraram que cadáver e túnel aumentam o BG. Esses são os resultados que mais se destacaram.

Os resultados aqui mostrados evidenciaram que os métodos usados neste trabalho possuem potencial para os trabalhos ambientais em cemitérios e forenses, na seguinte ordem: eletrorresistividade, SP e radiometria. De fato, eletrorresistividade e SP já são reconhecidos como ferramentas úteis para a investigação em necrópoles, como, por exemplo, em Carvalho Jr. (1997). Aqui, portanto, o objetivo foi começar a compreender com teste controlado o efeito do cadáver sobre as medidas de resistividade aparente e voltagem natural em condições amazônicas.

Uma grande diferença entre os métodos testados e o GPR é que esses métodos usam instrumental muito mais econômico, com frequência existente em várias instituições, e mais fácil de operar do que o radar. O processamento e a interpretação são também mais fáceis. Esse quadro por si só sugere que trabalhos acadêmicos com métodos alternativos como este devem ser realizados visando a ampliação da sua utilização em problemas forenses, além de problemas ambientais.

Uma outra diferença é que o radar amostra quase continuamente a subsuperfície. São recomendáveis novas investigações com espaçamento entre as leituras menor do que aqueles utilizados bem como o empilhamento de sinais (já realizado na eletrorresistividade), o que melhoraria sobremaneira a resolução dos métodos testados. Esses métodos, contudo, jamais atingirão a resolução do GPR.

É ainda recomendável realizar o trabalho por um período de tempo superior, de modo a observar os efeitos da estação de chuvas. Finalmente, para o rastreamento do necrochorume seria importante contar com mais de um cadáver.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

BARREIRA, C.; DINIS, P.; FIGUEIREDO, F.P.O. 2008. Estudo de plumas de contaminação provocadas por Cemitérios, caso de estudo no cemitério de Fonte de Angeão, Vagos. In: 9º Congresso de água, Cascais (Portugal), 2-4 abril 2008, APRH Associação Portuguesa de Recursos hídricos. Disponível em: <http://www.aprh.pt/congressoagua2008/comunicações/92.pdf>.

BECEGATO, V. A. **Aplicação de técnicas geofísicas e geoquímicas em duas glebas agrícolas no noroeste do estado do Paraná e suas relações com fertilizantes fosfatados**. 2005. 198f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Programa de Pós – Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, dez. 2005.

BELLO, L.A.L.; SADALLA NETO, S.F.; SANTOS FILHO, W.M. (2002) Geoenvironmental investigations for cemetery installation and its impact on the environment. – Amazônia University-UNAMA, Belém, Pará, Brasil.

BORGES, W.R., 2007. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**. 2007. 265f. Tese (Doutorado em Geofísica Aplicada), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP, São Paulo 2007.

CARVALHO Jr., M. A. F. de . **Aplicação de métodos geofísicos ao estudo de águas subterrâneas na grande Belém (Caso do Cemitério do Bengui)**. 1997. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de geologia, Belém, 1997.

CODEM, 1996. Ortofotos do Município de Belém – Áreas urbana e de expansão urbana. Prefeitura Municipal de Belém/Pará.

DAMASCENO, F.F. 2000. **Levantamento Geofísico do Cemitério do Tapanã**. 2000. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, Belém, 1996.

DANIELS, D. J. **Ground Penetrating Radar – 2 edition**. Londres: The Institution of Electrical Engineers, 2004. p. 423-436.

FONSECA, D. R. M. – 1994 – Contaminação das Águas Periféricas a Cemitérios de Belém. Belém. DHS/CT/UFGA. TCC. 25p.

FUKUE, M.; MINATO, T.; HORIBE, H.; TAYA, N. The micro-structures of clay given by resistivity measurements. **Engineering Geology**, n.54, p.43-53, 1999.

GALLAS, J. D. F. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia**

ambiental. 2000. 258f. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 2000.

GEOTOMO SOFTWARE. *Geoelectrical Imaging 2D & 3D*. Disponível em www.geoelectrical.com

INMET - 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.

MINTY, B.R.S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n.2, p. 39-50, 1997.

NASCIMENTO, C.T.C. do; FERREIRA, F.J.F.; ANDRADE, L.R.M. de; GASPAR, J.C.; PIRES, A.C.B. Radiação gama e resistividade elétrica em solo com aplicação de carbonatito e fertilizantes agrícolas no Distrito Federal. **RBGF**, v. 26, n.1, p.21-29, 2008.

NASCIMENTO, W. G.; Investigação geofísica ambiental e forense com os métodos radar e LIN nos cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém, Pa). Versão inédita de Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém. 2008.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid: Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, 1982. 578p.

SILVA, L.M.C.; SOUZA, D.M. 2008. Condutividade LIN em áreas de inumações de diferentes idades do Cemitério do Tapanã, Belém/PA. In: III Simpósio da SBGF. Novembro 2008. Sociedade Brasileira de Geofísica.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E., KEYS, D. A. **Applied Geophysics**. 1.ed. Cambridge University Press, United Kingdom, 1976, 860p.