



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

MÁRCIO ANTONIO DOS SANTOS SILVA

**INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA DA CONTAMINAÇÃO POR DERIVADOS
DE HIDROCARBONETOS NAS REDONDEZAS DO POSTO CRISTAL
(BELÉM-PA)**

BELÉM

2013

MÁRCIO ANTONIO DOS SANTOS SILVA

**INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA DA CONTAMINAÇÃO POR DERIVADOS
DE HIDROCARBONETOS NAS REDONDEZAS DO POSTO CRISTAL
(BELÉM-PA)**

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 Ciências.

Área de Concentração: Métodos Eletromagnéticos

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

BELÉM

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

S586i Silva, Márcio Antonio dos Santos

Investigação geofísica da contaminação por derivados de hidrocarbonetos nas redondezas do Posto Cristal (Belém-Pa) / Márcio Antonio dos Santos Silva; Orientadora: Lúcia Maria da Costa e Silva - 2013.

89fl.: il.

Dissertação (mestrado em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2011.

1. Radar. 2.GPR 3. Contaminação por hidrocarbonetos. 4. Posto de Combustíveis. 5. Polarização Induzida (IP). Eletroresistividade. I. Silva, Lúcia Maria da Costa e, *orient.* II. Universidade Federal do Pará III. Título.

CDD 22º ed.: 621.384

MÁRCIO ANTONIO DOS SANTOS SILVA

**INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA DA CONTAMINAÇÃO POR DERIVADOS
DE HIDROCARBONETOS NAS REDONDEZAS DO POSTO CRISTAL
(BELÉM-PA)**

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 Ciências.

Data de aprovação: / /

Banca Examinadora:

Prof. Lúcia Maria da Costa e Silva - Orientadora
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. José Gouvêa Luiz - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Welitom Rodrigues Borges - Membro
Doutor em Geofísica
Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB)

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a minha orientadora, Profa. Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva, pela paciência e dedicação que teve comigo, principalmente pela troca de idéias que possibilitou um melhor desenvolvimento desta dissertação.

Ao Prof. Dr. José Gouvêa Luiz, pela colaboração nas atividades de campo, bem como sugestões oportunas para o enriquecimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcos Welby, pelos esclarecimentos na parte computacional e sugestões.

Ao Pesquisador Welitom Borges, pelos primeiros passos na utilização do Software Reflexw e orientação na coleta de dados.

Aos colegas da Pós-Graduação, Clístenes Catete, João Andrade e Waldemir, pelo apoio e todos os momentos vivenciados.

Também não posso deixar de agradecer aos alunos da Graduação em Geofísica Alex Raiol, Anderson Santiago e Danusa Mayara, pela ajuda nas coletas de dados e também nos primeiros passos para com alguns softwares.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica, por oferecer um espaço físico estruturado e toda parte operacional, sendo necessário destacar o apoio do técnico de campo Paulo Magalhães e da secretária Benildes Lopes.

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

Finalmente, não posso esquecer-me de agradecer as duas coisas mais importantes da minha vida, minha mãe Francisca Silva e minha querida filha Brenda Pa-raense, que me apoiaram e souberam compreender minha ausência na convivência do lar.

RESUMO

Esta dissertação aborda a investigação de uma possível contaminação nas adjacências de um posto de combustíveis em Belém-PA. Foi realizada uma reunião dos dados técnicos existentes bem como a investigação com o método geofísico eletromagnético Ground Penetrating Radar (GPR) e os métodos elétricos da Polarização Induzida (IP) e da Eletrorresistividade. O grau de dificuldade que o problema representa para a Geofísica é extremo, seja porque a assinatura da contaminação confunde-se com a da argila, abundante no manto de intemperismo que cobre a região, seja porque inexistente descrição de furo de sondagem. Ainda assim, pelo menos um perfil levantado sugere a presença da contaminação na fase residual e outros permitem guiar o serviço de perfuração para comprovação dos resultados. Os resultados reunidos mostram que a classificação do vazamento na classe 3 da ASTM E1739-95 anteriormente atribuída ao vazamento no posto é impróprio, porque a situação parece ser mais grave.

Palavras-chave: Radar. GPR. Contaminação por hidrocarboneto. Posto de Combustíveis. Polarização Induzida (IP). Eletrorresistividade.

ABSTRACT

This dissertation approaches a possible contamination in the surroundings of a gas station in Belém -Pa. It was made a reunion of the existing technical data as well as the investigation with the Grounding Penetration Radar (GPR) method, and the electric induced polarization (IP) and resistivity methods. The degree of difficulty that the problem represents for the geophysics is extreme, because the signature of the contamination confuses with the clay, abundant in the mantle of weathering that covers the region, be it because there is no description of borehole. Despite of this, at least one of the profile suggests the presence of contamination in the residual phase and others permit to guide the perforation for the confirmation of the results. The results show that the classification of the leakage in the class 3 of the ASTM E1739-95 as attributed before is improper, because the situation seems to be more serious

Key words: Radar. GPR. Contamination by hydrocarbon. Gas Station. Induced polarization. Electrical Resistivity

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1- Posto Cristal, Rodovia Augusto Montenegro, Belém-PA.....	15
Figura 2.1 - Obtenção da gasolina e sua composição química	16
Figura 2.2 - Comportamento esquemático de vazamento de hidrocarbonetos na subsuperfície ao longo do tempo	19
Figura 2.3 - Comportamento esquemático de vazamento de hidrocarbonetos na subsuperfície	20
Figura 2.4 - Depressão do nível de água subterrânea resultante de grande frente de contaminação (A) e elevação do nível d' água (B)	22
Figura 3.1- Princípio biestático	28
Figura 3.2 - Princípio mono-estático	28
Figura 3.3 - Exemplo de radargrama obtido no campo com pré-processamento	29
Figura 3.4 - Off-set comum	30
Figura 3.5 - CMP	30
Figura 3.6 - WARR	30
Figura 3.7- Frequências de corte usadas na elaboração do filtro	31
Figura 3.8 - Polarização de eletrodo causada por uma partícula metálica em um eletrólito.....	34
Figura 3.9 - Polarização de membrana. (A) Meio poroso antes da aplicação de um campo elétrico. (B) Meio poroso após a aplicação de um campo elétri- co	34
Figura 3.10 - Esquema das medições de campo com o método da Eletrorresistividade	35
Figura 3.11 - Cilindro condutor	35
Figura 3.12 – Exemplo de semi-espaço homogêneo	36
Figura 3.13- Arranjo Wenner	39
Figura 3.14 - Arranjo Schlumberger	39
Figura 3.15 - Arranjo Wenner-Schlumberger	40
Figura 3.16 - Curva de Descarga IP	41

Figura 4.1 - Área sob estudo. A linha amarela mostra os limites do posto e a linha vermelha, os limites da área sob estudo. As linhas brancas representam os perfis de IP/Eletrorresistividade.....	44
Figura 4.2 - Gráfico da precipitação de Belém	46
Figura 4.3 - Resultado de VOC.	47
Figura 4.4 - Mapa do posto com a localização dos poços de monitoramento.....	48
Figura 4.5 - Mapas de atenuações medidas com a antena de 200 MHz em dezembro de 2009. Profundidades: a) 1 m, b) 2 m e c) 3 m.	51
Figura 4.6 - Mapa de atenuações medidas com a antena de 200 MHz em março de 2009. Profundidades: a) 1 m, b) 2 m e c) 3 m.	52
Figura 5.1 - Levantamento com GPR realizado próximo a um poço de abastecimento domiciliar nos fundos do Posto Cristal	54
Figura 5.2 - Levantamento IP/Eletrorresistividade realizado em residência (Perfil 6).....	55
Figura 6.1 - Radargrama GPR-1: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado.....	58
Figura 6.2 –Radargrama GPR-2: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado	59
Figura 6.3- Radargrama GPR-3: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado	60
Figura 6.4- Radargrama GPR-4: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado.....	61
Figura 6.5- Radargrama GPR-5: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado	62
Figura 6.6- Radargrama GPR-6: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado.....	64
Figura 6.7 - Radargrama GPR-7: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado	65
Figura 6.8 - Pseudo-seções IP-2: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão.....	67
Figura 6.9 - Pseudo-seções IP-5: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão....	69
Figura 6.10 - Pseudo-seções IP-6: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão..	70
Figura 6.11 - Pseudo-seções IP-7: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão..	72

Figura 6.12 - Pseudo- seções de eletrorresistividade 2: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão.....	73
Figura 6.13 - Pseudo- seções de eletrorresistividade 5: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão	75
Figura 6.14 - Pseudo- seções de eletrorresistividade 6: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão. As linhas brancas limitam zonas de condutividade mais elevada.....	76
Figura 6.15 - Pseudo- seções de eletrorresistividade 7: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão.....	77
Figura 6.16 - Perfil 2: (a) localização; resultados de (b) GPR, (c) IP e (d) Eletrorresistividade.....	80
Figura 6.17 - Perfil 5: (a) localização; resultados de (b) GPR, (c) IP e (d) Eletrorresistividade.....	81
Figura 6.18 - Perfil 6: (a) localização; resultados de (b) GPR, (c) IP e (d) Eletrorresistividade.....	82
Figura 6.19 - Perfil 7: (a) localização; resultados de (b) GPR, (c) IP e (d) Eletrorresistividade.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Padrão de potabilidade para consumo humano de acordo com a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde	18
Tabela 3.1 - Valores da constante dielétrica (ϵ_r), condutividade elétrica (σ), velocidade (v) e atenuação (α) para alguns materiais	26
Tabela 4.1 - Características dos tanques	45
Tabela 4.2 - Características das bombas	45
Tabela 4.3 - Análise de riscos ASTM E1739-95. Em destaque, a classe atribuída ao vazamento sob estudo	49
Tabela 4.4- Resultados da análise da água dos poços coletada em 07/01/2009 ...	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS EM SUBSUPERFÍCIE	16
3	MÉTODOS GEOFÍSICOS	23
3.1	GPR	23
3.1.1	Fundamentos	23
3.1.2	Processamento	29
3.2	IP E ELETORRESISTIVIDADE	32
3.2.1	Origens do IP	32
3.2.2	Fundamentos da Eletrorresistividade	33
3.2.3	Aquisição de Dados de IP e Eletrorresistividade	37
3.2.3.1	IP no Domínio do Tempo e no Domínio da Frequência.....	40
3.2.4	Interpretação de Dados de IP e Eletrorresistividade	42
4	ÁREA SOB ESTUDO	44
4.1	DESCRIÇÃO DO POSTO CRISTAL.....	44
4.2	GEOLOGIA.....	45
4.3	CLIMA.....	46
4.3	ESTUDOS ANTERIORES	47
4.3.1	ENSR - 2007	47
4.3.2	CEIMIC - 2009	49
4.3.3	UFPA - 2009	49
5	AQUISIÇÃO DE DADOS	53
5.1	GPR	53
5.2	IP E ELETORRESISTIVIDADE.....	54
6	INTERPRETAÇÃO	56
6.1	GPR	56
6.1.1	Radargrama GPR-1	56
6.1.2	Radargrama GPR-2	56
6.1.3-	Radargrama GPR-3	57
6.1.4	Radargrama GPR-4	57

6.1.5	Radargrama GPR-5	57
6.1.6	Radargrama GPR-6	63
6.1.7	Radargrama GPR-7	63
6.2	IP E ELETORRESISTIVIDADE	66
6.2.1	Pseudo-Seção IP-2	66
6.2.2	Pseudo-Seção IP-5	68
6.2.3	Pseudo-Seção IP-6	68
6.2.4	Pseudo-Seção IP-7	68
6.2.5	Pseudo-Seção Eletorresistividade-2	71
6.2.6	Pseudo-Seção Eletorresistividade-5	71
6.2.7	Pseudo-Seção Eletorresistividade-6	71
6.2.8	Pseudo-Seção Eletorresistividade-7	74
6.3	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS	77
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

A contaminação de águas subterrâneas por vazamentos em postos de combustíveis, porque oferece riscos à saúde da população em geral e aos ecossistemas, vem se tornando um grande problema nos centros urbanos e merecendo cada vez mais atenção tanto da população em geral como do poder público.

O vazamento de combustíveis pode ocorrer por diversos fatores, como derrames e acidentes durante o transporte, transferência e armazenamento do combustível, vazamentos devido à corrosão do tanque e da tubulação bem como instalações inadequadas.

Para se ter uma idéia da dimensão do problema, em fins da década de 90, a Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana estimava que existissem mais de 1,5 milhões de tanques subterrâneos de armazenamento de gasolina nos Estados Unidos. Destes, 400.000 já haviam sido substituídos ou adaptados às legislações federais que entraram em vigor no final de 1998. Ainda em função destas legislações, mais de 250.000 casos de vazamentos foram identificados e mais de 97.000 remediações completadas até 1995. Semanalmente, mais de 1.000 novos vazamentos eram encontrados em todo o território norte-americano (BRATBERG ; HOPKINS, 1995).

Em 2007, existiam no Pará 1.128 postos de combustíveis cadastrados na Agência Nacional do Petróleo (ANP) (ALMEIDA, 2007). A vida útil dos tanques de armazenamento é de aproximadamente 25 anos. Parte dos tanques localizados no Estado do Pará tem mais de 25 anos de uso, o que conseqüentemente pode aumentar a probabilidade de vazamentos.

Em um derramamento de gasolina, uma das principais preocupações é a contaminação de aquíferos. A detecção precoce da contaminação torna-se muito importante para conter o seu espalhamento no meio ambiente.

A Geofísica oferece métodos de investigação da subsuperfície que permitem obter resultados significativos para a detecção e o controle da contaminação, fundamentais para os procedimentos de limpeza do subsolo.

Os métodos geofísicos mais utilizados neste tipo de estudo são os métodos elétricos e eletromagnéticos. A contaminação pela presença de hidrocarbonetos na subsuperfície pode ser detectada tanto pelo aumento como redução da resistividade elétrica do meio. Logo após a contaminação, o meio se mostra resistivo, pelo fato desses compostos orgânicos apresentarem elevada resistividade. Com o decorrer do tempo, devido à atuação de bactérias que provocam a biodegradação dos combustíveis gerando ácidos, o meio torna-se condutivo (SAUCK, 2000).

Nesta dissertação, a suposta contaminação em subsuperfície provocada pelo Posto Cristal, localizado na rodovia Augusto Montenegro em Belém do Pará, nos seus arredores foi estudada com o método eletromagnético Radar de Penetração de Solo (Ground Penetrating Radar-GPR) e os métodos elétricos da Polarização Induzida (IP) e Eletrorresistividade.

A presença de combustível na água do abastecimento das casas foi denunciada por moradores das redondezas do Posto Cristal (Figura 1.1). Ao atingir as águas subterrâneas, os combustíveis, devido à grande toxicidade de seus compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX), podem inviabilizar a exploração de aquíferos para abastecimento de água para consumo humano, daí a importância deste trabalho.

Figura 1.1- Posto Cristal, Rodovia Augusto Montenegro, Belém-PA.



Fonte: Do autor

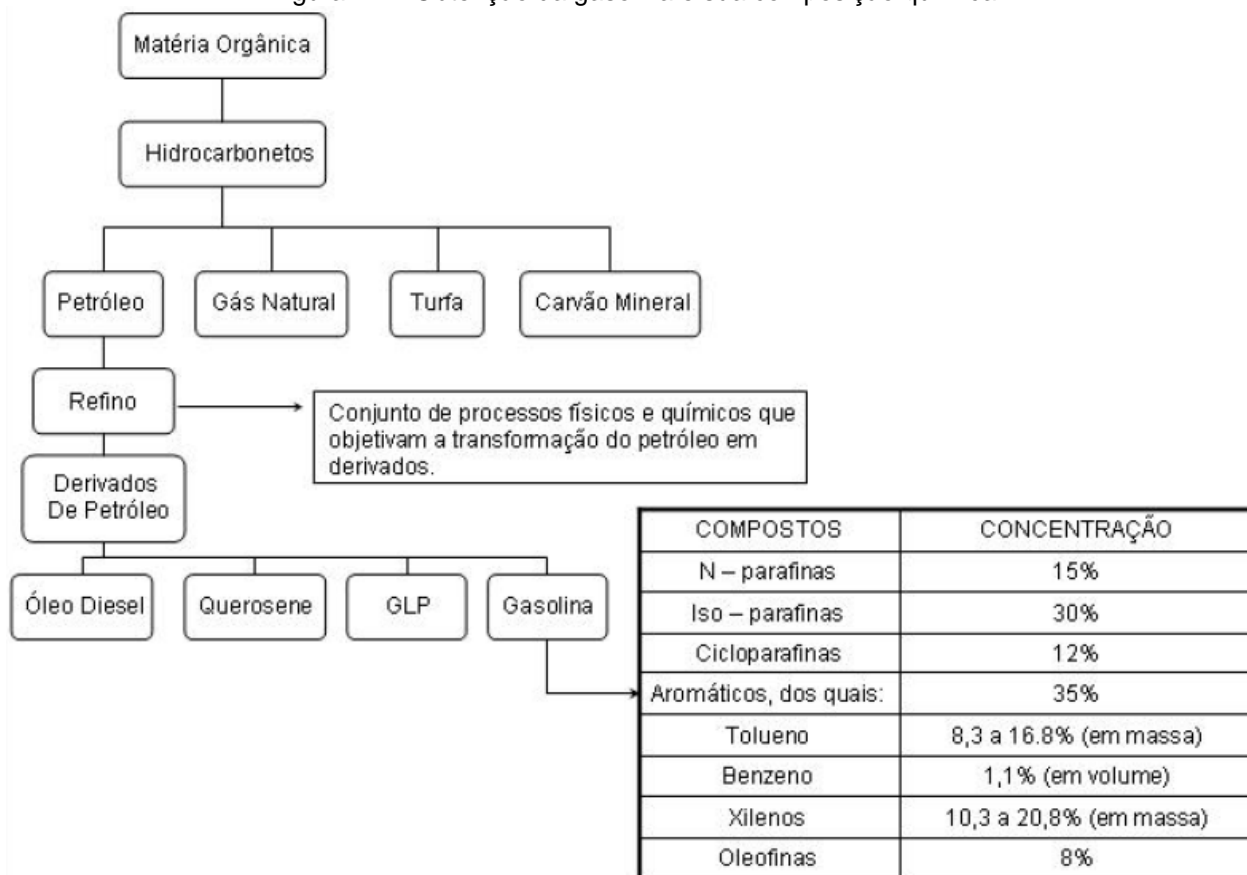
2 CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS EM SUBSUPERFÍCIE

O petróleo é formado por uma mistura de hidrocarbonetos, composta por diversos tipos de moléculas formadas principalmente por carbono e hidrogênio e, em menor quantidade, oxigênio, nitrogênio e enxofre.

Este combustível fóssil é originado a partir do soterramento de matéria orgânica juntamente com sedimentos em um ambiente sem a presença de oxigênio.

Os derivados de petróleo sofrem vários processos como destilação, refinamento e aditivação, até a transformação da matéria prima nos seus derivados. A composição química dos produtos derivados depende dos processos de industrialização e da composição química do óleo cru (Fig. 2.1).

Figura 2.1 - Obtenção da gasolina e sua composição química



Fonte: (CARDINALI, 2007).

Os compostos de hidrocarbonetos, por apresentarem baixa miscibilidade em água, costumam ser denominados “nonaqueous phase liquid” (fase líquida não aquosa) ou, abreviadamente, NAPL. De acordo com a densidade, as NAPLs são classificados nas categorias “light nonaqueous phase liquids” (fase líquida não aquosa leve) ou LNAPL e “dense nonaqueous phase liquids” (fase líquida não aquosa densa) ou DNAPL. As LNAPL são mais leves que a água, sendo representados principalmente pelos hidrocarbonetos associados à produção, refino e distribuição de produtos do petróleo, como a gasolina e o óleo diesel. As DNAPLs, por sua vez, são mais densos que a água, englobando, por exemplo, solventes clorados e alguns pesticidas.

A gasolina é constituída por inúmeros compostos que são predominantemente alifáticos e aromáticos. Deste último grupo fazem parte os compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, conhecidos como BTEX, que, devido a sua maior solubilidade e volatilidade, apresentam um maior risco de contaminação.

Os BTEX são poderosos agressores do sistema nervoso central, pois apresentam uma toxicidade crônica, mesmo quando encontrados em pequenas concentrações. Entre os componentes do BTEX, o benzeno se destaca como o mais tóxico de todos, por se tratar de uma substância comprovadamente cancerígena mesmo se ingerida em baixas concentrações (TIBURTIUS et al., 2004).

A composição da gasolina varia de acordo com o local onde é produzida. No Brasil, a gasolina contém 23% de álcool, conforme disposto na Resolução do Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA) n.º 36, de 31 de outubro de 2006, publicada no Diário Oficial da União em 10 de novembro de 2006, com uma margem de erro admissível de mais ou menos 1%, de acordo com o art. 9º, parágrafo 2º, da Lei 10.203/2001 (ANP, 2009).

As interações entre o etanol e os compostos BTEX podem causar um comportamento da pluma de contaminação totalmente diferente daquele observado em países onde a gasolina não contém álcool. A presença de etanol pode facilitar a dissolução do BTEX em água, causando um aumento da mobilidade do BTEX. Além disso, CORSEUIL & MARINS (1998) destacam que o etanol pode ser biodegradado preferencialmente, o que inibe a biodegradação dos compostos BTEX.

Tabela 2.1 - Padrão de potabilidade para consumo humano de acordo com a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

Parâmetro	Valor Máximo Permitido -VMP (mg/l)
<i>Benzeno</i>	0,005
<i>Tolueno</i>	0,2
<i>Etil-benzeno</i>	0,17
<i>Xileno</i>	0,3

Fonte: Brasil (2004).

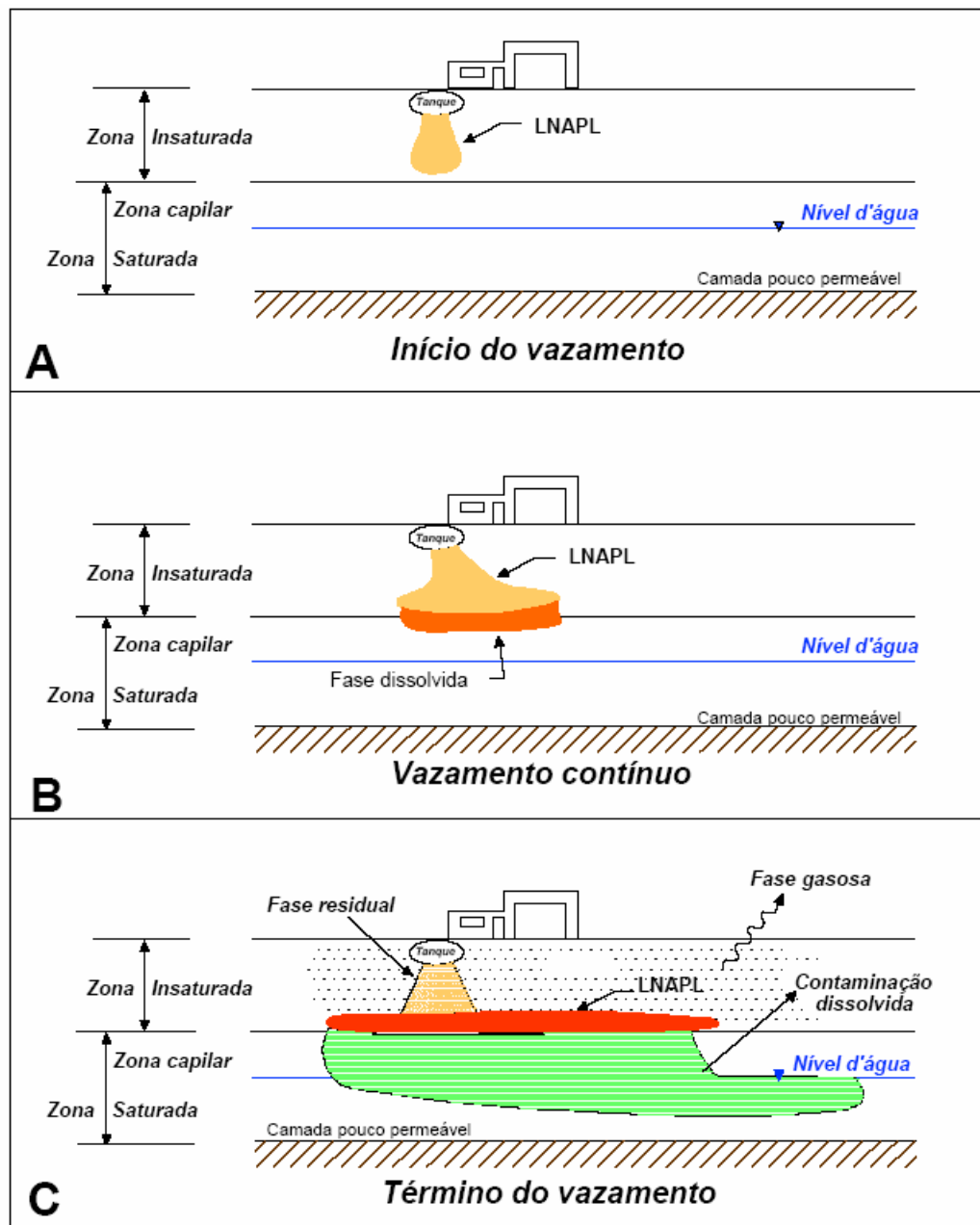
Quando ocorrem vazamentos, o transporte de LNAPL através de zonas não saturadas e saturadas depende do volume do líquido derramado.

Quando a quantidade do volume derramado é pequena, a LNAPL penetra pela zona não saturada de forma descendente pela ação da gravidade e é absorvida pelos grãos (fase residual). A infiltração de água no solo dissolve os componentes solúveis presentes na LNAPL e os transporta até a zona saturada, formando uma pluma que se distribui por difusão e advecção (fase dissolvida). Os compostos voláteis presentes na LNAPL sofrem partição, sendo que uma parte fica retida no solo e a outra migra para o ar, sendo então transportada para outras partes do aquífero por difusão molecular (fase gasosa). Os voláteis movem-se primeiramente pela zona não saturada até atingirem a camada superficial do solo, onde, dependendo das condições físico-químicas, podem retornar para a fase líquida por condensação. Esse processo de volatilização pode provocar o transporte de contaminantes por áreas muito extensas.

Quando um grande volume de LNAPL é derramado, esta se desloca no sentido da franja capilar próxima à zona saturada. Os componentes solúveis do contaminante ultrapassam os componentes menos solúveis. No topo da franja capilar, onde a água satura um grande volume dos poros, o material acumulado provoca uma redução da permeabilidade relativa da LNAPL. Impedido de mover-se para baixo, o contaminante se espalha sobre o topo da franja capilar (fase livre) e, se o volume de LNAPL acumulado for suficientemente grande, ele tende a se deslocar no mesmo sentido do fluxo da água da subsuperfície. Pode ocorrer um enorme acúmulo do contaminante sobre a franja capilar, formando uma depressão na interface LNAPL–zona saturada.

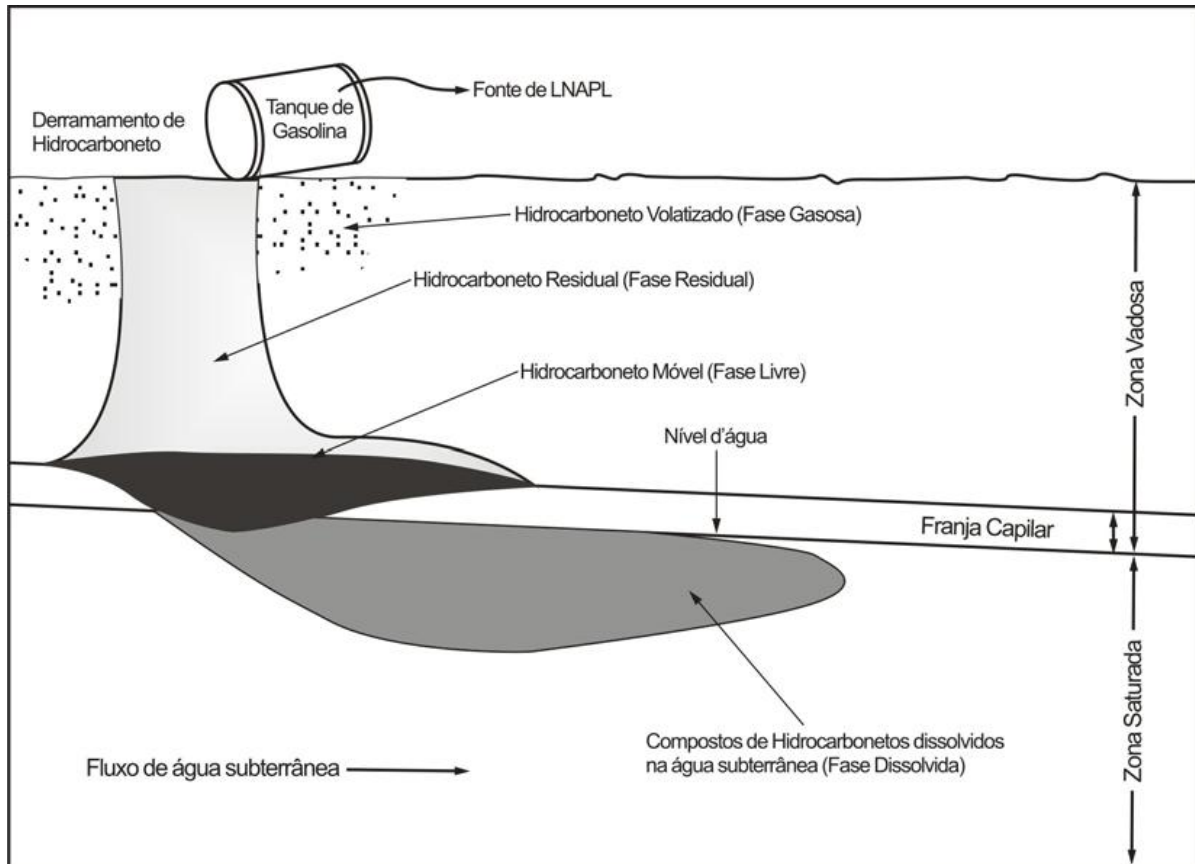
Mancini (2002) ilustra o processo ao longo do tempo (Figura 2.2), enquanto Fetter (1993) destaca o vazamento formando a depressão na interface LNAPL–zona saturada (Fig. 2.3).

Figura 2.2 - Comportamento esquemático de vazamento de hidrocarbonetos na subsuperfície ao longo do tempo



Fonte: (MANCINI, 2002).

Figura 2.3 - Comportamento esquemático de vazamento de hidrocarbonetos na subsuperfície.



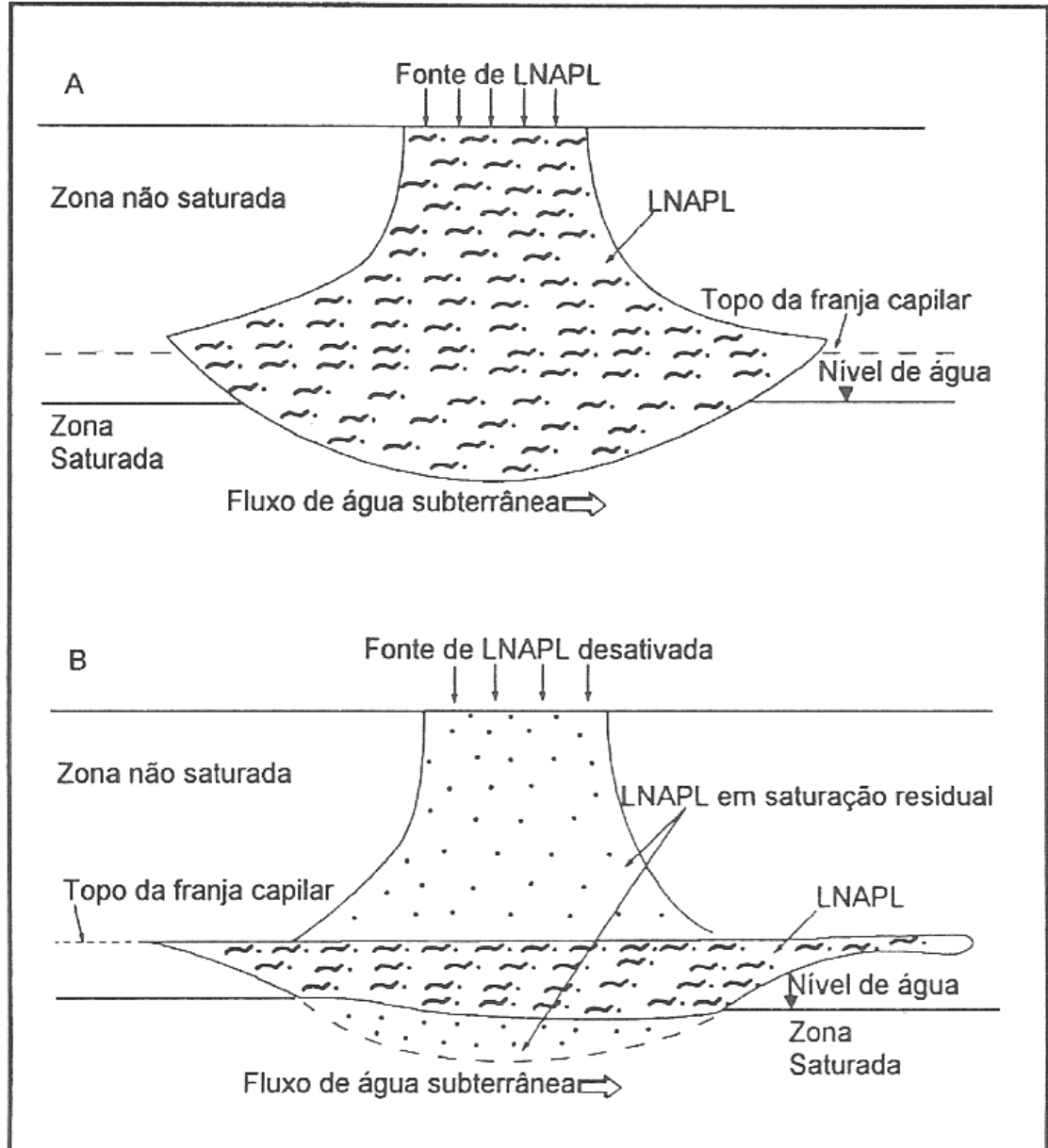
Fonte: Modificado de (FETTER, 1993).

No caso de remoção ou esgotamento da fonte poluidora, a LNAPL presente na zona saturada continua a migrar para níveis mais profundos, estacionando quando a concentração atinge o nível de saturação residual e não pode mais avançar. A lixiviação da LNAPL existente acima da zona insaturada provoca uma redução da frente de contaminação na interface LNAPL–zona saturada, fazendo com que a zona saturada retroceda. Este retrocesso faz com que a água da subsuperfície desloque a LNAPL que se encontra em estado de saturação residual. Parte das águas descendentes pode dissolver os materiais residuais, criando uma pluma de contaminação dissolvida na zona saturada.

O bombeamento da água da zona saturada e as mudanças sazonais provocam um rebaixamento do nível da água. Quando a LNAPL está localizada no topo da zona saturada, ocorre também o seu rebaixamento. Quando a zona saturada retorna a sua posição normal, parte do contaminante é empurrada para cima, mas não totalmente: em razão da saturação residual, uma parte permanece nos poros abaixo do novo nível da zona saturada (Figura 2.4). Desta forma, a LNAPL pode ocupar uma grande espessura da zona saturada, provocando a contaminação de um grande volume de água (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998).

Os derivados de petróleo apresentam uma elevada resistividade elétrica. Ao serem derramados no solo provocam, conseqüentemente, o aumento da resistividade do meio. Com o passar do tempo, no entanto, a ação de bactérias produz a biodegradação dos compostos orgânicos presentes na gasolina. A biodegradação leva à formação de ácidos que dissolvem íons presentes no subsolo, o que causa a diminuição da resistividade elétrica do meio, ou seja, torna o ambiente condutivo (SAUCK, 2000).

Figura 2.4 - Depressão do nível de água subterrânea resultante de grande frente de contaminação (A) e elevação do nível d' água (B)



Fonte: (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998).

3 MÉTODOS GEOFÍSICOS

3.1 GPR

O Radar de Penetração de Solo ou, simplesmente, GPR, do inglês “Ground Penetrating Radar”, é um método geofísico muito utilizado ultimamente na investigação ambiental. O GPR emite radiação eletromagnética de alta frequência (na faixa de 10 a 2500 MHz) e detecta as sucessivas reflexões que ocorrem no subsolo, devido a diferenças em suas propriedades eletromagnéticas, o que permite estimar as profundidades das interfaces de reflexão, conhecendo-se a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. Os princípios envolvidos são semelhantes à reflexão sísmica. O GPR pode detectar objetos enterrados, interfaces geológicas em subsuperfície, bem como cavidades e fissuras.

3.1.1 Fundamentos

O GPR fundamenta-se na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas, descrita pelas equações de Maxwell.

A primeira equação, conhecida como lei de Ampère, mostra uma relação entre o campo magnético \vec{H} , a densidade de corrente \vec{J} e a variação da densidade de corrente de deslocamento \vec{D} com o tempo t :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} . \quad (3.1)$$

Segundo a segunda equação de Maxwell, conhecida como Lei de Faraday, a variação do campo indução magnética \vec{B} em relação ao tempo gera campo elétrico \vec{E} :

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} . \quad (3.2)$$

A terceira equação, por sua vez, é conhecida como lei de Gauss da Magnetostática. Ela descreve a ausência de monopolos magnéticos:

$$\nabla \vec{B} = 0. \quad (3.3)$$

Finalmente, a quarta equação relaciona a densidade de fluxo elétrico ou vetor deslocamento elétrico \vec{D} com a pela densidade volumétrica de cargas ρ :

$$\nabla \vec{D} = \rho. \quad (3.4)$$

Existem outras relações entre os campos, conhecidas como relações constitutivas da matéria, que variam de um meio a outro, conforme a sua constituição:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (3.5)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{e} \quad (3.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (3.7)$$

em que μ é a permeabilidade magnética, σ é a condutividade elétrica e ε é a permissividade dielétrica do meio material.

Normalmente, para os estudos de GPR, em vez da permissividade dielétrica é comum utilizar-se a permissividade dielétrica relativa ε_r ou constante dielétrica, que é também uma medida da capacidade de polarização do material na presença de um campo elétrico.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (3.8)$$

com ε_0 como a permissividade dielétrica do vácuo.

Partindo-se das equações de Maxwell com o auxílio das relações constitutivas, é possível chegar à equação da onda

$$\nabla^2 \vec{E} = i\omega\mu\sigma\vec{E} - \omega^2\mu\varepsilon\vec{E}, \quad (3.9)$$

em que ∇^2 é o laplaciano, i é $\sqrt{-1}$ e ω é a frequência angular.

A solução geral para a equação da onda é representada por

$$E = E_0 e^{i(\alpha z - \beta z)} e^{-\alpha z} , \quad (3.10)$$

sendo E_0 a máxima amplitude da onda, z a profundidade e α e β os parâmetros que contém as propriedades eletromagnéticas do meio (WARD; HOHMANN, 1987). Na equação 3.10, a primeira exponencial controla a propagação, enquanto a segunda exponencial, a atenuação, daí α e β serem chamadas de constante de propagação e constante de atenuação, sendo dadas respectivamente por

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} e \quad (3.11)$$

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} . \quad (3.12)$$

A velocidade de propagação das ondas v é dada por:

$$v = \frac{c}{\left\{ \varepsilon_r \mu_r \frac{1 + \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{2} \right\}^{\frac{1}{2}}} , \quad (3.13)$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo (0,3 m/ns) e $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ a permeabilidade magnética relativa, com μ_0 como a permeabilidade magnética no vácuo.

Quando são empregadas altas frequências. $\omega^2 \varepsilon^2 \gg \sigma^2$, de modo que, nos meios não magnéticos ($\mu_r = 1$), a equação 3.13 pode ser simplificada para

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} , \quad (3.14)$$

que é a equação mais empregada na estimativa da velocidade da onda do GPR.

A tabela 3.1 reúne valores para a constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade e atenuação de alguns materiais.

Tabela 3.1 – Valores da constante dielétrica (ϵ_r), condutividade elétrica (σ), velocidade (v) e atenuação (α) para alguns materiais.

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (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 e Annan (1989).

A profundidade de penetração das ondas é limitada pela condutividade elétrica do solo e pela frequência das ondas emitidas. Com o aumento de condutividade a penetração diminui, porque a energia eletromagnética é mais rapidamente dissipada, causando uma perda de sinal em profundidade. Frequências altas não penetram até a mesma profundidade que as frequências mais baixas, mas dão uma melhor resolução.

A impedância intrínseca Z definida por Stratton (1941) é uma grandeza física que está associada à atenuação de uma onda quando esta, ao se propagar na subsuperfície, sofre reflexões e refrações sempre que encontra variações nas propriedades eletromagnéticas do meio:

$$Z = \frac{\sqrt{i\omega\mu}}{\sqrt{\sigma + i\omega\epsilon}}. \quad (3.15)$$

A proporção de energia refletida é determinada pelo contraste entre as propriedades eletromagnéticas ou entre as impedâncias intrínsecas do meio, podendo ser avaliada pelo coeficiente de reflexão definido por:

$$CR = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (3.16)$$

em que os índices 1 e 2 referem-se aos meios 1 e 2 de propriedades diferentes.

Quando a condutividade elétrica (σ) é pequena, a impedância intrínseca é aproximada por

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (3.17)$$

e o coeficiente de reflexão por

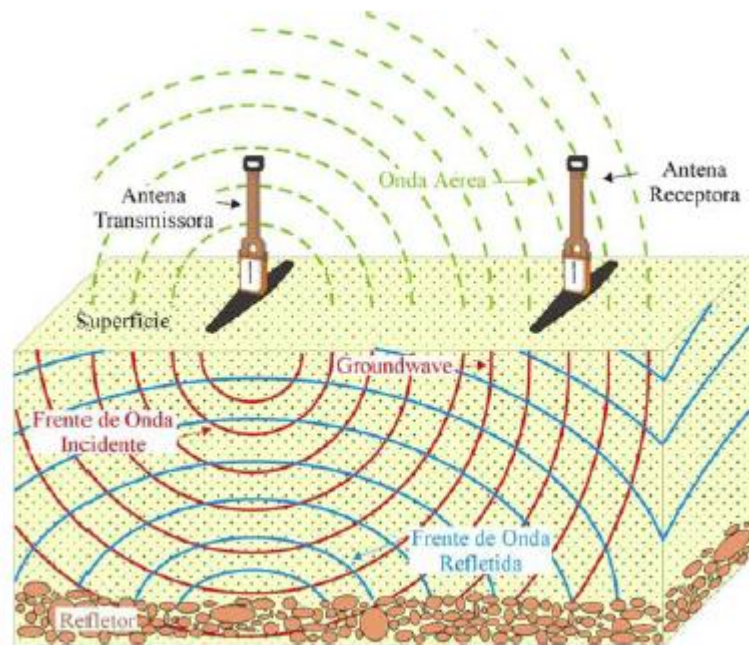
$$CR = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}. \quad (3.18)$$

3.1.2 Aquisição de Dados

O equipamento GPR emite radiação eletromagnética através de antenas emisoras e receptoras (princípio biestático) (Figura 3.1) ou apenas uma antena contendo as duas funções (princípio mono-estático) (Figura 3.2). Com a primeira configuração pode-se variar a distância entre as duas antenas, permitindo assim medições de grandes ângulos de reflexão e refração, o que pode melhorar a resolução.

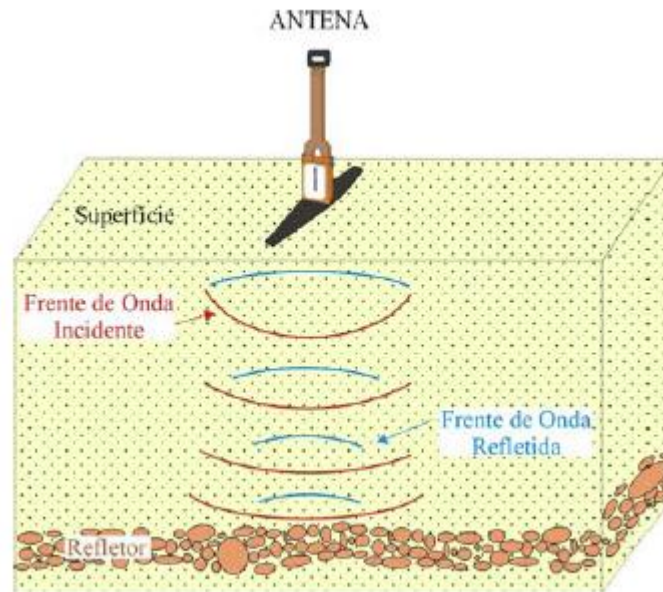
O sinal refletido pelo subsolo é amplificado, digitalizado e registrado por meio digital para o pré-processamento e visualização, com freqüência no próprio campo, dos dados (radargrama) (Figura 3.3).

Figura 3.1– Princípio biestático.



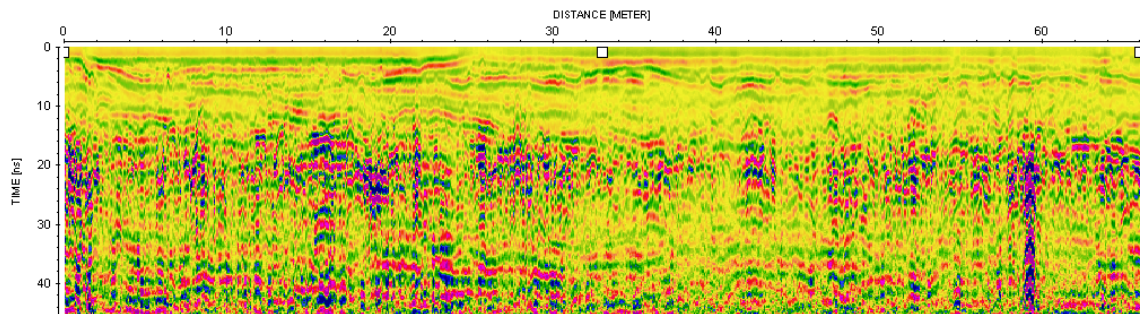
Fonte: (BORGES, 2002).

Figura 3.2 – Princípio mono-estático



Fonte: (BORGES, op.cit.).

Figura 3.3 – Exemplo de radargrama obtido no campo com pré-processamento.



Existem basicamente três técnicas de aquisição de dados de GPR ao longo de perfis:

- 1) afastamento constante, em que as antenas encontram-se separadas de uma distância fixa (“off-set” comum) (Figura 3.4);
- 2) sondagem de velocidade (“common mid point” ou CMP) (Figura 3.5) e
- 3) wide angle reflection and refraction-WARR (figura 3.6).

3.1.2 Processamento

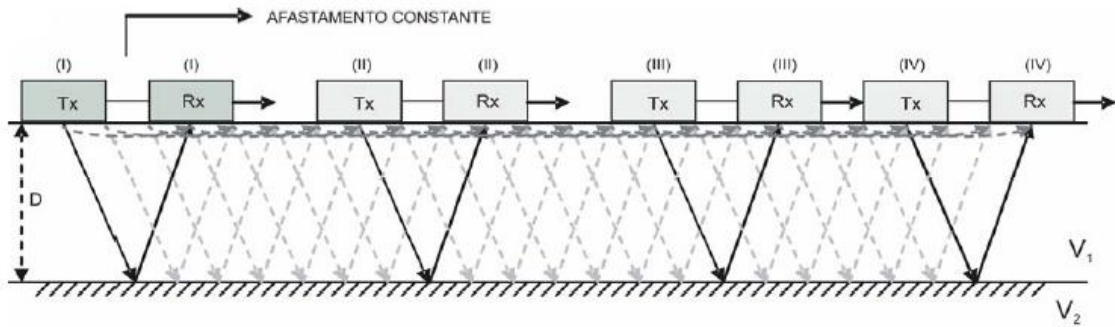
Os dados foram processados através do software REFLEXW - 4.5 (SANDMEIER, 2009), seguindo a sequência descrita a seguir.

Markerinterpol – interpolação de marcadores de distância ao longo do perfil manual ou automaticamente. Marcas a mais ou a menos ou sem o espaçamento correto podem, então, ser corrigidas. Foi utilizado o valor do incremento de traço de 0,02 m.

Set time zero – remoção de ondas diretas (ar).

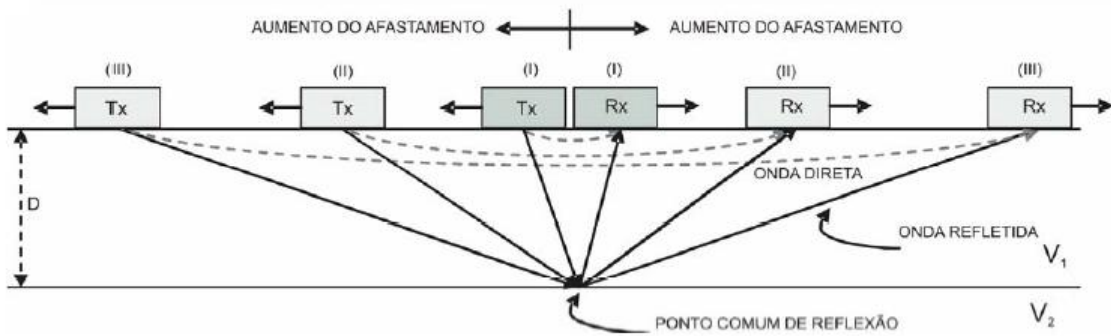
Subtract-mean (Dewow) – remoção das ondas de baixas frequências. Foi utilizado o valor de 5 ns na janela de tempo.

Figura 3.4 – Off-set comum



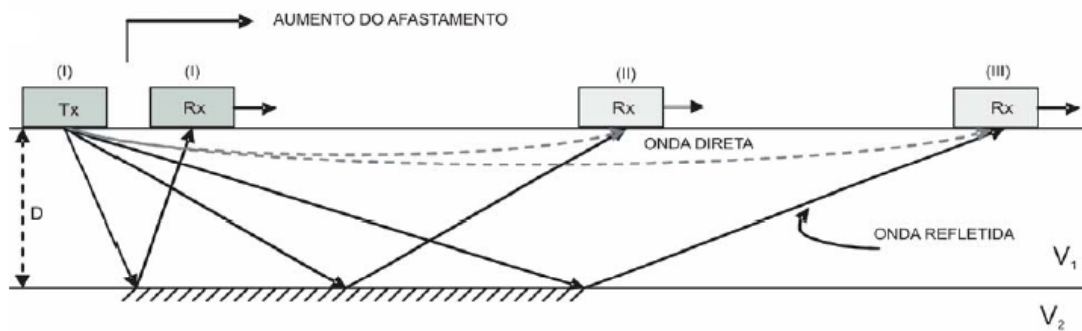
Fonte: Adaptada de (REYNOLDS, 1997).

Figura 3.5 – CMP



Fonte: Adaptada de (REYNOLDS, 1997).

Figura 3.6 – WARR



Fonte: Adaptada de (REYNOLDS, op.cit.).

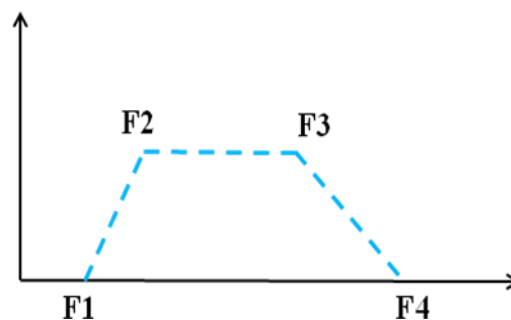
Energy decay – recuperação da energia dissipada e maximização dos contrastes, para maior nitidez das mudanças de propriedades da subsuperfície.

Bandpassfrequency – filtragem para eliminação de ruídos, bem como reverberações nos dados. A faixa do filtro é ajustada através de quatro valores de frequência obtidos após vários testes com diversas frequências, de forma que os valores das frequências formem um trapézio e a frequência central da antenna fique entre os valores de F2 e F3 (Figura 3.7).

Time-Depth Conversion – conversão da escala de tempo para a escala de profundidade, usando o valor da velocidade da onda do local igual a 0,085 m/ns, que foi obtida por meio de ajuste hiperbólico e permite visualizar os tanques subterrâneos do Posto Cristal na profundidade em que estão enterrados (REIS JR, 2009).

Migration diffraction stack – colapso de difrações, registradas como hipérboles no caso de corpos pontuais ou semi-hipérboles nas extremidades de estruturas planares, e retirada de possíveis eventos cruzados, para localizar os objetos em suas posições reais e, ainda, realçar os refletores horizontais.

Figura 3.7– Frequências de corte usadas na elaboração do filtro.



3.2 IP E ELETRORRESISTIVIDADE

Há vários aspectos comuns aos métodos da polarização induzida (IP) e o método da Eletrorresistividade. Os equipamentos usados para a aquisição de IP, comumente fornecem também medidas de Eletrorresistividade.

O método da Eletrorresistividade começou a se desenvolver em 1920, por meio do engenheiro francês Conrad Schlumberger. Foi também nesse período que, ao prospectar sulfetos com o método da Eletrorresistividade, Schlumberger observou, quando a corrente elétrica introduzida no subsolo era interrompida, que o campo elétrico gerado artificialmente não cessava bruscamente, mas de uma maneira lenta, em virtude da polarização induzida no terreno (ORELLANA, 1974).

A polarização induzida é um método muito usado na prospecção mineral, particularmente na detecção de jazidas de sulfetos disseminados. Mais recentemente, o IP vem sendo utilizado para outros fins, entre os quais a detecção e a caracterização de áreas contaminadas por hidrocarbonetos (por exemplo, BRAGA e CARDINALI 2005 e MARTINHO et al. 2006).

3.2.1 Origens do IP

A polarização induzida pode ser explicada por dois fenômenos físico-químicos que são a polarização de eletrodo e a polarização de membrana.

A corrente elétrica é geralmente transportada no terreno através dos íons de diferentes fluidos (eletrólitos) presentes nos poros das rochas, ou seja, trata-se de corrente iônica. Quando partículas minerais condutoras de eletricidade estão em contato com o eletrólito, elas obstruem o fluxo de íons, fazendo com que essas cargas iônicas se acumulem no limite partícula mineral – eletrólito, as cargas positivas onde a corrente penetra e as negativas onde ela sai, o que leva à polarização da partícula, fenômeno conhecido como polarização de eletrodo, e causa uma tensão que se opõe ao fluxo da corrente (Figura 3.8). Quando a corrente injetada é interrompida, os íons acumulados nos limites partícula mineral – eletrólito se movem retornando ao estado de equilíbrio elétrico que havia antes da corrente ser injetada, o que leva um certo tempo. A corrente iônica assim produzida gera um potencial que vai, portanto, decrescendo com o tempo.

A polarização de membrana ocorre, em geral, devido à presença de minerais de argila. A superfície de partículas de argila encontra-se, comumente, carregada negativamente, o que atrai íons positivos presentes nos eletrólitos que preenchem os condutos capilares do agregado argiloso (

Figura 3.9). Forma-se então uma dupla camada elétrica que atua como barreira ao fluxo de íons em volta da partícula, impedindo o fluxo de ânions (

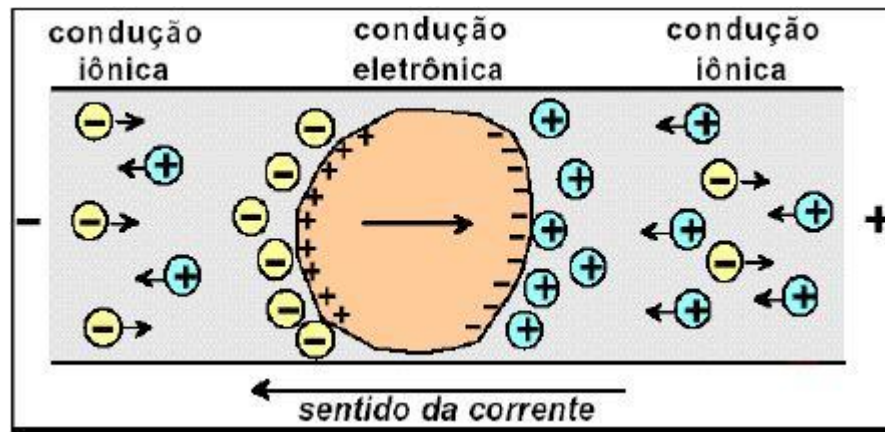
Figura 3.9) (WARD, 1990). Ao desligar-se a corrente injetada, as cargas positivas se distribuem de volta à posição inicial de equilíbrio, gerando uma voltagem decrescente com o tempo (PARASNIS, 1971). As argilas produzem a polarização de membrana diferentemente; por exemplo, a montmorilonita produz um grande efeito e a caolinita, um efeito pequeno.

3.2.2 Fundamentos da Eletrorresistividade

O método da Eletrorresistividade emprega uma corrente elétrica artificial, contínua ou alternada de baixa frequência, que é injetada no terreno através de dois eletrodos (**A** e **B**), sendo a diferença de potencial elétrico causado pela passagem de corrente medida por meio de outros dois eletrodos (**M** e **N**) (Figura 3.10). A relação entre potencial medido e corrente elétrica injetada, levando-se em consideração a disposição geométrica dos eletrodos no terreno, permite calcular a resistividade aparente da subsuperfície.

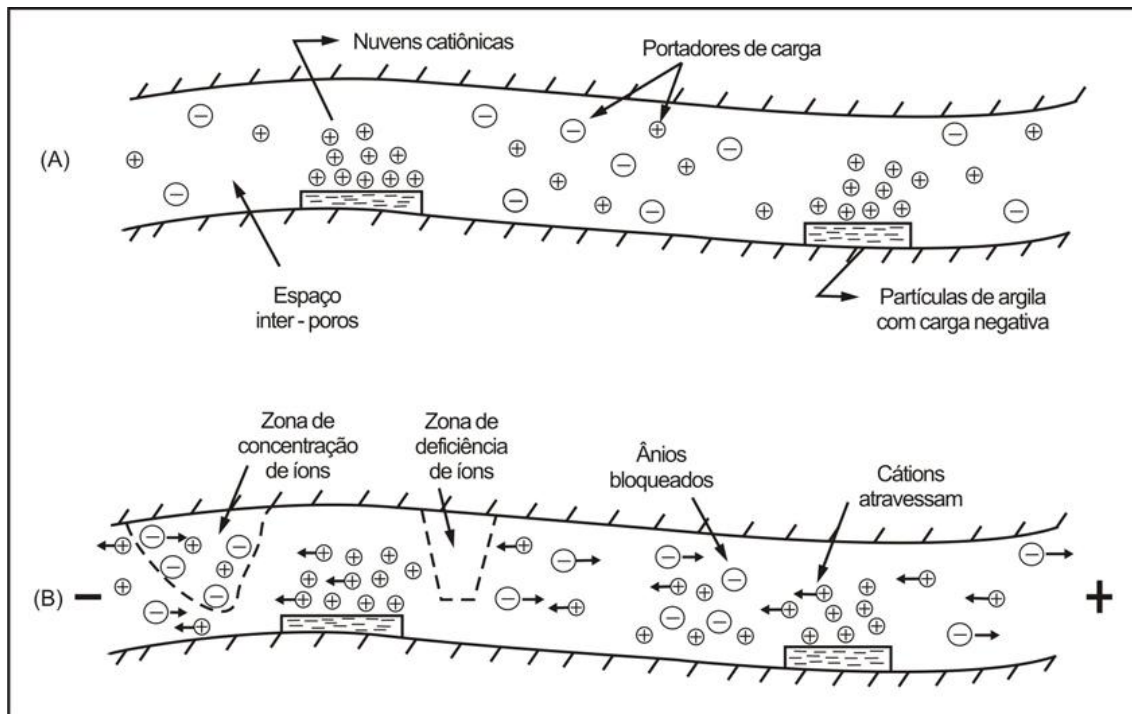
A resistividade dos solos e rochas é afetada principalmente por quatro fatores que são: composição mineralógica, porosidade, quantidade e natureza dos sais minerais dissolvidos e teor de água nos poros. Entre esses fatores, os mais relevantes são a quantidade de água armazenada nos poros e a salinidade dessa água. O aumento do valor desses fatores, teor de umidade e quantidade de sais dissolvidos, leva a uma redução da resistividade. Essa condição é que permite a aplicação do método em estudos hidrogeológicos e, mais recentemente, estudos ambientais, pois, normalmente, as substâncias contaminantes geram líquidos com elevada concentração de sais.

Figura 3.8 - Polarização de eletrodo causada por uma partícula metálica em um eletrólito.



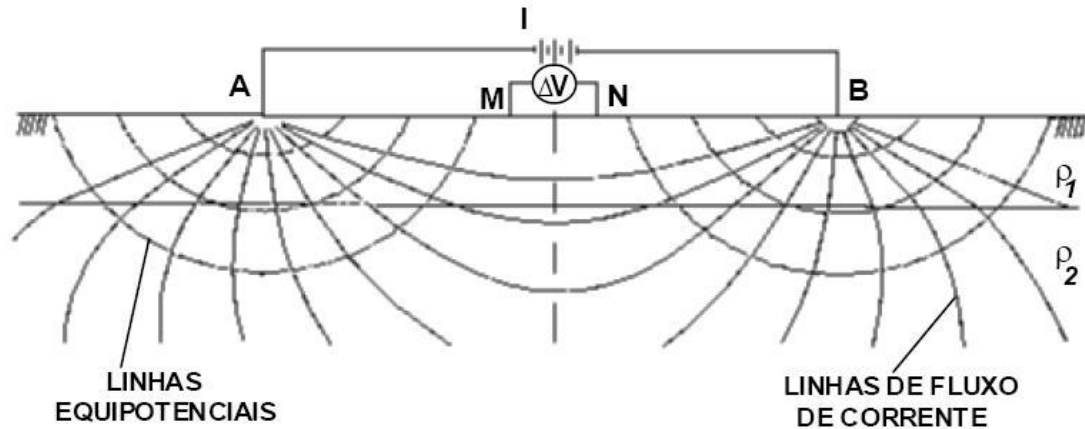
Fonte: Modificada de (ORELLANA, 1974).

Figura 3.9 - Polarização de membrana. (A) Meio poroso antes da aplicação de um campo elétrico. (B) Meio poroso após a aplicação de um campo elétrico



Fonte: Modificada de Ward (1990).

Figura 3.10 - Esquema das medições de campo com o método da Eletrorresistividade



Fonte: (BRAGA, 1997).

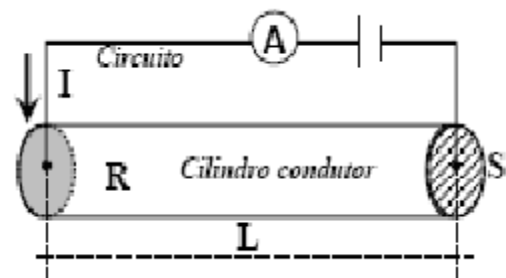
Segundo a lei de Ohm, a relação entre a resistência elétrica R de um condutor cilíndrico homogêneo de comprimento L e seção transversal S e sua resistividade elétrica ρ , é dada por:

$$R = \frac{\rho L}{S}, \quad (3.19)$$

o que permite escrever

$$\rho = \frac{RS}{L}, \quad (3.20)$$

Figura 3.11 – Cilindro condutor.

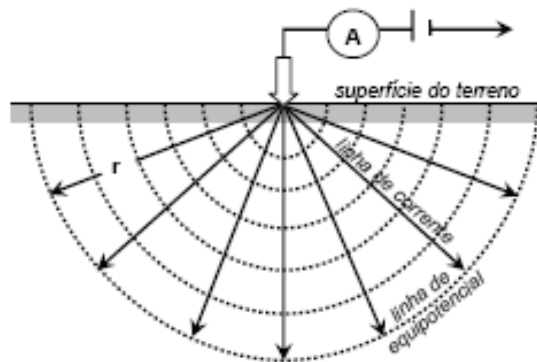


O cilindro condutivo, quando atravessado por corrente elétrica I , estará submetido a uma diferença de potencial elétrico ΔV , e sua resistência será:

$$R = \frac{\Delta V}{I}. \quad (3.21)$$

Quando a corrente elétrica atravessa o solo, ela não flui por um único caminho como na Figura 3.11; neste caso, é considerado que ela flui por todo o semi-espço homogêneo, isotrópico e uniforme representativo da subsuperfície (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Exemplo de semi-espço homogêneo



A equação 3.19, para o semi-espço, transforma-se em:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r}. \quad (3.22)$$

Substituindo-se a equação 3.21 na equação 3.20, resulta em:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}, \quad (3.23)$$

sendo r a distância entre o eletrodo e o ponto no qual o potencial é medido.

Usando (3.23), o potencial nos eletrodos M e N da figura 3.10, que recebe contribuição da corrente dos eletrodos A e B, pode ser calculada por:

$$V_M^{(A)} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi AM}, \quad V_M^{(B)} = \frac{\rho(-I)}{2\pi BM}, \quad (3.24)$$

$$V_N^{(A)} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi AN}, \quad V_N^{(B)} = \frac{\rho(-I)}{2\pi BN}. \quad (3.25)$$

Logo, a diferença de potencial ΔV entre os pontos M e N é:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} c, \quad (3.26)$$

com

$$c = \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}, \quad (3.27)$$

A resistividade elétrica de um meio homogêneo pode, então, ser obtida por meio de:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K, \quad (3.28)$$

sendo

$$K = \frac{2\pi}{c}. \quad (3.29)$$

Em um meio homogêneo, mudando-se as posições de A e B entre si, bem como de M e N, sempre se obtém o mesmo valor de ρ , pois ΔV e I ajustam-se ao valor de K de modo a produzir o mesmo ρ , o que não ocorre quando o meio não é homogêneo. Neste caso, os valores de resistividade medidos são chamados de resistividade aparente ρ_a e correspondem aos valores que a resistividade teria se o terreno fosse homogêneo.

3.2.3 Aquisição de Dados de IP e Eletrorresistividade

Há diversos arranjos de eletrodos utilizados para a aquisição tanto de dados de IP como de dados de Eletrorresistividade, por exemplo, Wenner (Figura 3.13), Schlumberger (Figura 3.14) e Wenner-Schlumberger (Figura 3.15), uma junção dos dois primeiros arranjos.

No arranjo Wenner, os eletrodos de corrente e os de potencial são dispostos em linha, de forma eqüidistante.

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 3.13- Arranjo Wenner.

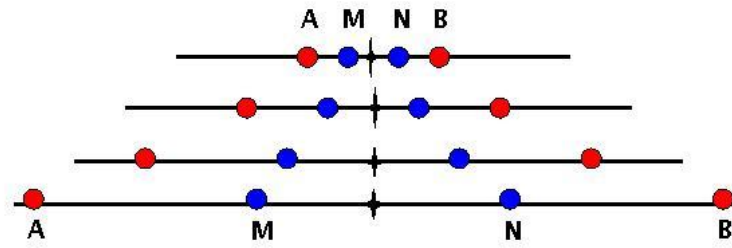


Figura 3.14 - Arranjo Schlumberger.

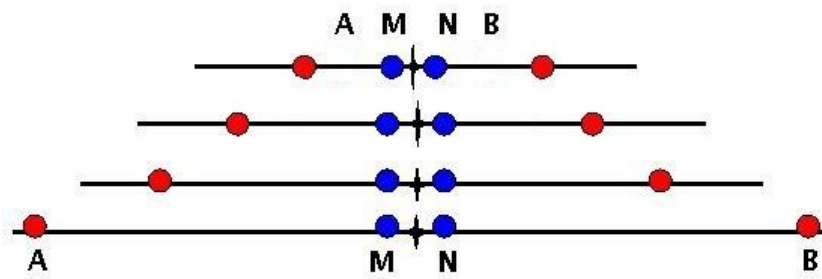
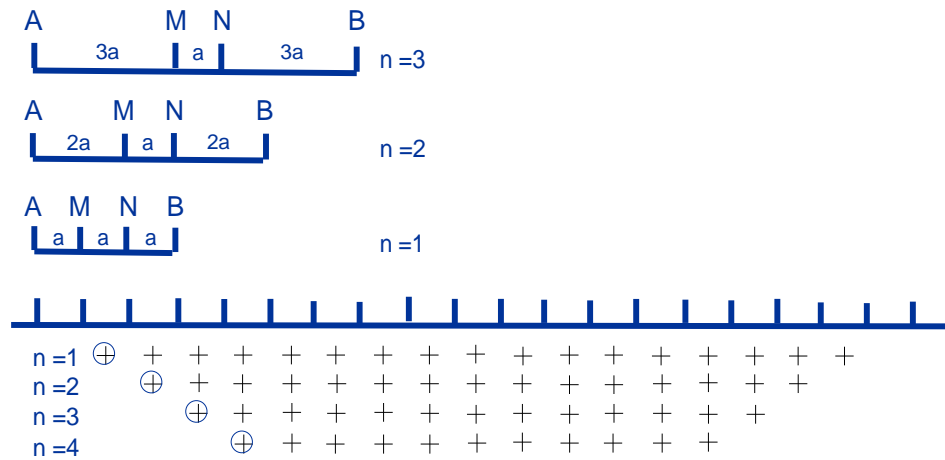


Figura 3.15 – Arranjo Wenner-Schlumberger



Fonte: (COSTA, 2007).

Com o arranjo Wenner-Schlumberger, é obtido o primeiro nível do imageamento com os eletrodos percorrendo todo o perfil da mesma forma que o arranjo Wenner. Em seguida, o procedimento é realizado usando maiores espaçamentos entre os eletrodos de corrente e potencial; de modo que após o terceiro nível, o arranjo se torna um arranjo Schlumberger, com a separação entre os eletrodos de corrente muito maior do que a distância entre os eletrodos de potencial.

Neste trabalho o arranjo aplicado foi o Wenner-Schlumberger, porque foi aquele que deu a melhor resposta em relação aos arranjos dipolo-dipolo e Wenner.

3.2.3.1 IP no Domínio do Tempo e no Domínio da Frequência

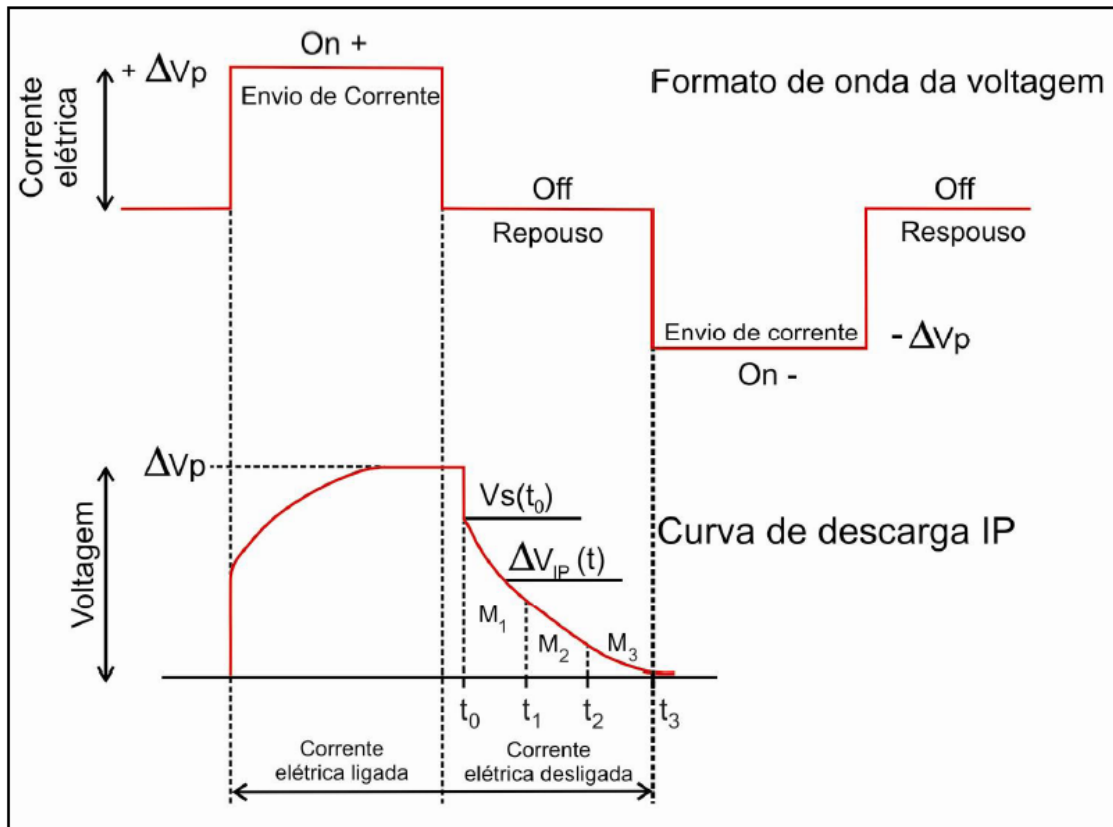
O fenômeno IP pode ser medido no domínio do tempo e no domínio da frequência.

No domínio do tempo, ao se injetar corrente elétrica no solo por intermédio de eletrodos de corrente, instala-se uma diferença de potencial elétrico primário no solo (ΔV_p), que pode ser medida através de eletrodos de potencial. Quando a corrente injetada é cortada, a diferença de potencial primária (ΔV_p) não se anula instantaneamente,

mas varia com o tempo na forma de uma curva $\Delta V_{IP} = f(t)$, também chamada de curva de descarga IP (Figura 3.16).

A curva de descarga IP possui uma amplitude que varia com o meio que está sendo investigado, ou seja, está diretamente relacionada com a maior ou menor capacidade que os terrenos possuem de se polarizar. O efeito da polarização induzida no domínio do tempo é obtido comparando-se os valores da diferença de potencial elétrico residual existente após a interrupção de corrente num determinado intervalo de tempo, seja entre t_1 e t_2 , ao potencial primário (TELFORD et. al., 1990):

Figura 3.16 - Curva de Descarga IP



Fonte: (FACHIN, 2007).

$$M = \frac{1}{\Delta V_p} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IP} dt, \quad (3.30)$$

em que M é conhecida como cargabilidade. Como ΔV_{IP} é medido em milivolts, ΔV_p em volts e o tempo em segundos, a unidade de cargabilidade é tempo em milisegundos (ms). Como a curva de descarga leva tanto mais tempo quanto maior for à polarização do meio, valores altos de cargabilidade indicam que o meio é rico em materiais que se polarizam.

No domínio da frequência, aplica-se corrente elétrica alternada com duas frequências no subsolo através de dois eletrodos de corrente e mede-se a diferença de potencial entre os eletrodos de potencial. Sabendo-se o valor da corrente injetada e medindo-se a diferença de potencial é possível calcular a resistividade aparente do meio como será visto no item seguinte. Medindo-se a resistividade aparente para duas frequências distintas, obtém-se o efeito de frequência percentual (PFE):

$$PFE = \frac{\rho_a(f_1) - \rho_a(f_2)}{\rho_a(f_1)} \times 100(\%), \quad (3.31)$$

sendo $f_1 < f_2$ com f_1 e f_2 variando entre 0,1 e 10 Hz (TELFORD et al., 1990). O maior valor de ρ_a é obtido com a menor frequência. O PFE é tanto maior quanto maior for a polarização do meio.

Neste trabalho, as medidas foram feitas no domínio do tempo, porque o equipamento disponível da UFPA trabalha nesse domínio.

3.2.4 Interpretação de Dados de IP e Eletrorresistividade

Martinho et al. (2006) apresentam resultados IP no domínio do tempo de ensaios laboratoriais para estudar contaminações orgânicas (gasolina, isopentano, tolueno e benzeno) em amostras de solo argiloso. Os autores mostraram que a resposta de IP depende da concentração dos poluentes no solo e que a cargabilidade diminui com o aumento da concentração desses poluentes.

Segundo Braga (2005), nos vazamentos de derivados de hidrocarbonetos, o fator tempo é fundamental. Vazamentos recentes deverão apresentar altos valores de resis-

tividade e baixos valores de cargabilidade, já vazamentos antigos tornam o meio condutivo, logo fornecem baixos valores de resistividade, e apresentam altos valores de cargabilidade.

O vazamento estudado comporta-se como antigo, ou seja, mostra-se condutivo (REIS JUNIOR, 2009).

Os dados obtidos de IP e de Eletrorresistividade foram apresentados e interpretados por meio do programa RES2DINV da Geotomo Software (GEOTOMO, 2009). A interpretação é realizada pelo método de inversão conhecido como suavidade. Foram utilizadas apenas 5 iterações, como sugerido no manual do programa, pois um maior número de iterações não redundou em uma solução melhor.

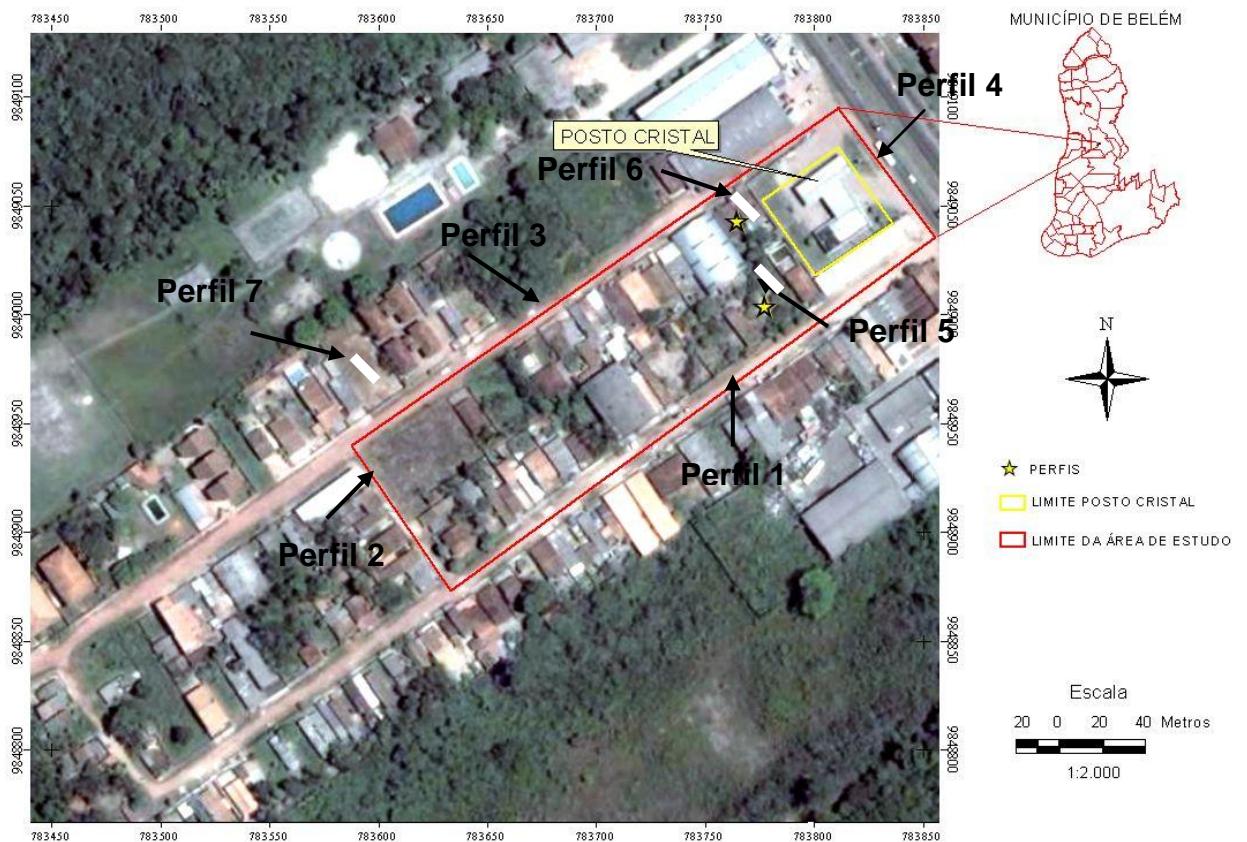
4 ÁREA SOB ESTUDO

4.1 DESCRIÇÃO DO POSTO CRISTAL

O Posto Cristal está localizado no km 5 da Rodovia Augusto Montenegro, no bairro Parque Verde, na região metropolitana de Belém, Estado do Pará (figura 4.1).

O Posto entrou em operação em 1990. Os combustíveis armazenados no posto cristal são gasolina comum (GC), gasolina aditivada (GA), diesel comum (DC) e, também, álcool comum (AC). O posto revende combustível da Shell. As características dos tanques bem como das bombas são mostradas nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Figura 4.1 - Área sob estudo. A linha amarela mostra os limites do posto e a linha vermelha, os limites da área sob estudo. As linhas brancas representam os perfis de IP/Eletrorresistividade.



Fonte: Do autor

Tabela 4.1 - Características dos tanques.

Nº	Tipo (AST/UST/Tambor)	Produto	Ano de instala- ção	Status	Compartimento	Material	Capacidade (l)
01	UST	GA	1990	Ativo	Simple	Aço	15.000
02	UST	GA	1990	Desativado	Simple	Aço	15.000
03	UST	GA	1990	Desativado	Simple	Aço	15.000
04	UST	GC	1990	Desativado	Simple	Aço	15.000
05	UST	DC	1990	Desativado	Simple	Aço	15.000
06	UST	AC	1997	Desativado	Simple	PDAF	15.000
07	UST	OQ	1990	Desativado	Simple	Aço	5.000

Fonte: (ENSR, 2007).

Tabela 4.23 – Características das bombas

Nº.	Tipo	Ano de Instalação	Status	Nº de Con- trole	Tanque/ com- partimento	Condição
01	Quádrupla	1990	Desativada	-	1 e 2	Produto na base
02	Quádrupla	1990	Desativada	-	3e 4	Boas
03	Quádrupla	1990	Ativa	-	5 e 6	Boas

Fonte: (ENSR, 2007).

4.2 GEOLOGIA

A cidade de Belém está assentada, quase que totalmente, sobre a unidade Pós-Barreiras do Quaternário, sobreposta ao Grupo Barreiras do Terciário.

A unidade Pós-Barreiras é constituída por sedimentos inconsolidados, arenosos, variando de tonalidade entre o amarelo e o totalmente branco, com alguma porcenta-

gem de argila. Também se encontra nessa unidade seixos milimétricos de quartzo leitoso, dispostos caoticamente, e concreções ferruginosas (MATTA, 2002).

Localmente, o solo é constituído por aterro; solo arenoso marrom, solo arenoso marrom com fragmentos de rocha, solo argilo-arenoso marrom, solo argiloso marrom e solo argilo-arenoso marrom com fragmentos de rocha (ENSR, 2007).

A geomorfologia regional e local é caracterizada pela baixa declividade, não susceptível a enchentes e inundações.

Segundo a ENSR, o nível d'água médio do local é de 4,57 m, a direção preferencial de fluxo se dá para oeste/sudoeste e a velocidade de fluxo seria de apenas cerca de 0,435 m/ano (ENSR, op.cit.).

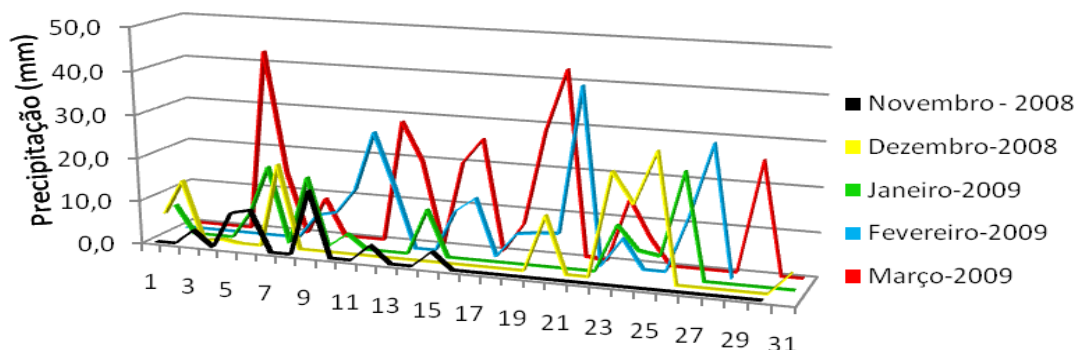
No dia 14 de dezembro de 2008 foi medido em poço amazonas da residência sito à Alameda Hélio Pinheiro de Almeida, nº40, a SW do Posto, nível d'água inferior a 2 m de profundidade.

4.3 CLIMA

O clima na região metropolitana de Belém é quente e úmido, com temperatura média de 26°C (máxima de 34°C e mínima de 18°C) e precipitação anual em torno de 2500 a 3000 mm/ano. Há uma maior concentração das chuvas entre os meses de dezembro a junho. A umidade relativa do ar é de aproximadamente 85%.

A Figura 4.2 mostra a precipitação de Belém nas datas de coleta de dados de campo.

Figura 4.2 – Gráfico da precipitação de Belém.



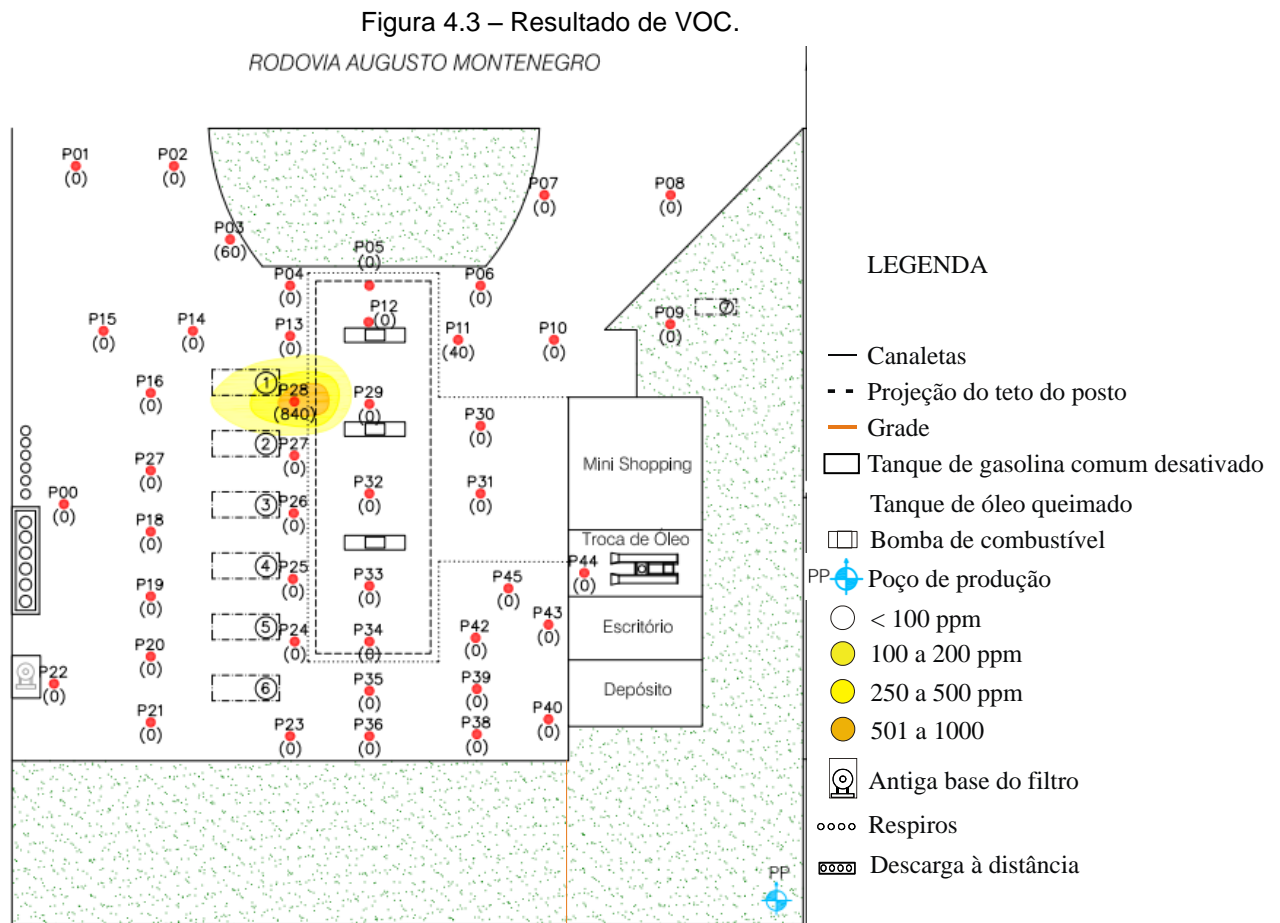
Fonte: (INMET, 2009).

4.3 ESTUDOS ANTERIORES

4.3.1 ENSR - 2007

Entre 30 de junho e 4 de julho de 2007 foi realizado um estudo de campo no posto Cristal, como parte da investigação ambiental e análise de risco solicitada pela Shell Brasil Ltda à empresa Enviromental Services Internacional Brasil (ENSR).

Compostos orgânicos voláteis (Volatile Organic Compounds - VOC) – das quarenta e seis análises realizadas, três pontos apresentaram concentrações de VOC entre 40 e 840 ppm, indicando a presença da fase vaporizada de hidrocarbonetos no solo nas proximidades do tanque 1 (Figura 4.3) (ENSR, 2007).

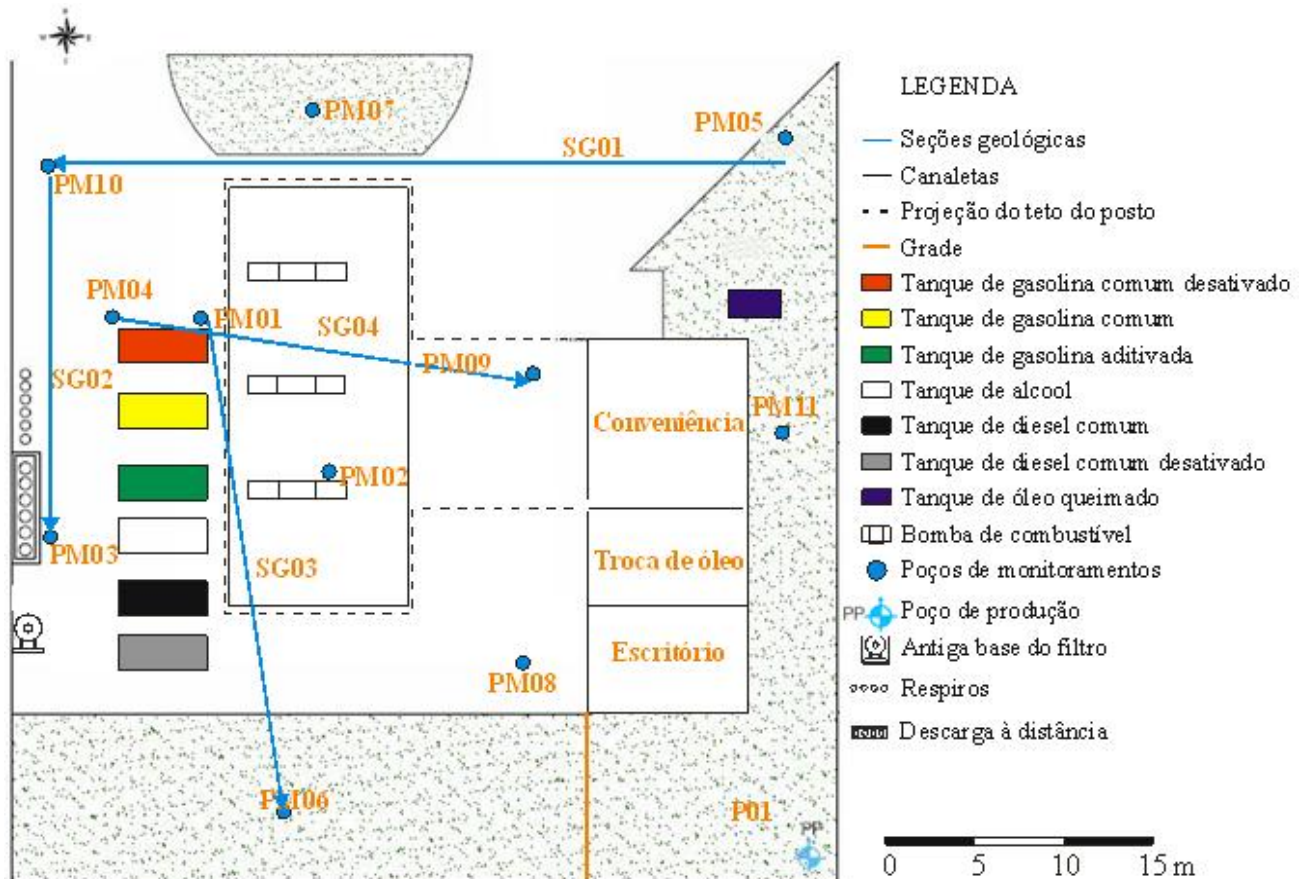


Fonte: (ENSR, 2007).

BTEX – a análise de 12 amostras de água subterrânea indicaram a presença de benzeno (0,00775 mg/l) e tolueno (0,02471 mg/l) e xileno (0,02236 mg/l) apenas no PM-04, perto do tanque 1 (Figura 4.4), identificando a presença de pluma de BTEX de fase dissolvida nas proximidades do tanque 1 (em vermelho), delimitada e restrita à área do empreendimento (ENSR, 2007). Esse e os demais tanques haviam sido instalados em 1990, exceto o tanque 6, que foi instalado em 1997.

O relatório classificou o vazamento em estudo na classe 3 da classificação ASTM E1739-95 (ENSR, 2007) (Tabela 4.1).

Figura 4.4 – Mapa do posto com a localização dos poços de monitoramento



Fonte: (ENSR, 2007).

□

Tabela 4.3 – Análise de riscos ASTM E1739-95.
Em destaque, a classe atribuída ao vazamento sob estudo.

<i>Classificação</i>	<i>Riscos</i>
<i>Classe 1</i>	<i>Dano imediato à saúde ou segurança humana ou de outros receptores sensíveis.</i>
<i>Classe 2</i>	<i>Dano em curto prazo (0 a 2 anos) para a saúde ou segurança humana ou de outros receptores sensíveis.</i>
Classe 3	Dano em longo prazo (mais de 2 anos) para a saúde ou segurança humana ou de outros receptores sensíveis.
<i>Classe 4</i>	<i>Nenhum dano demonstrável em longo prazo para a saúde ou segurança humana ou de outros.</i>

Fonte: (ASTM INTERNATIONAL, 2009).

4.3.2 CEIMIC - 2009

No dia 7 de janeiro de 2009, amostras de água foram coletadas em oito poços localizados nas proximidades do posto cristal e analisadas pela empresa CEIMIC – Análises Ambientais de São Paulo. Os resultados apresentados na Tabela 4.2 mostram que seis poços apresentaram concentrações de compostos BTEX na água acima do padrão de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde (Tabela 2.1)

4.3.3 UFPA - 2009

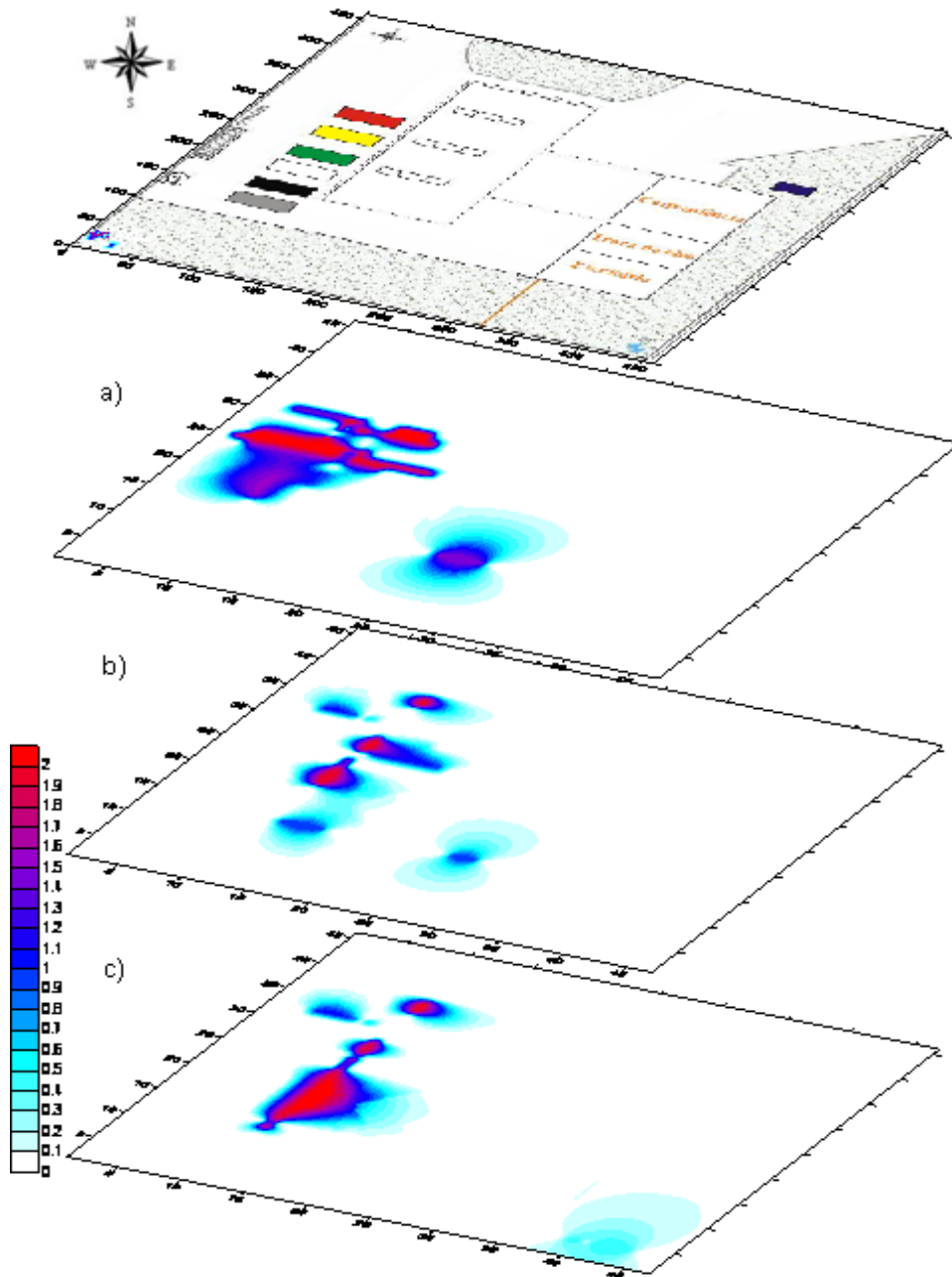
Reis Jr (2009) mostra mapas de atenuação do sinal eletromagnético para três profundidades (1, 2 e 3 m) da área interior ao posto em sua dissertação de mestrado defendida na UFPA. Os mapas de atenuação foram baseados na classificação dos dados de 13 radargramas obtidos dentro do posto Cristal com antenas blindadas de 200 MHz, segundo a seguinte escala de interpretação: 0, 0,5, 1, 1,5 e 2, em que o valor 0 corresponde a zonas de não atenuação do sinal eletromagnético e 2 corresponde à máxima atenuação encontrada. Não entram nestes mapas, as atenuações provocadas pela presença de argila, identificada por meio dos perfis geológicos construídos com os dados da ENSR (2007). Em outras palavras, os mapas revelam a posição das prováveis contaminações (fase residual e fase livre) acima do nível d'água médio do local, que é de 4,57 m (ENSR, op.cit.). Os mapas obtidos ao final do período seco (dezembro de 2008) são mostrados na Figura 4.5, enquanto os mapas do final do período chuvoso (março de 2009), na Figura 4.6.

Tabela 4.4- Resultados da análise da água dos poços coletada em 07/01/2009

Amostra	Local de coleta	Hora da coleta	Coordenadas do poço	Prof. poço (m)	Resultados da análise (ppm)
01 AM-0536-0801	Al. José Custódio de Almeida, 3 Resid. Sr. Mauro Roberto F. dos Santos	11:15	S 01° 21,862' W 48° 26,993'	12,0	Benzeno 0,331 Tolueno 0,492 Etilbenzeno 0,057 m, p- Xilenos 0,637 o-Xilenos 0,363 Xilenos total 0,999
02 AM-0536-08-02	Al. José Custódio de Almeida, 11 Resid. Sr. Carlos Cardoso Pinho	11:32	S 01° 21,883' W 48° 27,017'	14,0	Benzeno ND Tolueno ND Etilbenzeno ND m, p- Xilenos ND o-Xilenos ND Xilenos total ND
03 AM-0536-08-03	Al. José Custódio de Almeida, 6 ISOAMAZON Ind. E Comércio de Art. Plástico	11:40	S 01° 21,860' W 48° 27,010	12,0	Benzeno 0,003 Tolueno 1 Etilbenzeno ND m, p- Xilenos ND o-Xilenos ND Xilenos total ND
04 AM-0536-08-04	Al. Hélio Pinheiro, 40 Resid. Sra Maria do Socorro de Araújo	11:58	S 01° 21,881' W 48° 26,993'	9,0	Benzeno 0,332 Tolueno 0,511 Etilbenzeno 0,031 m, p- Xilenos 0,554 o-Xilenos 0,325 Xilenos total 0,879
05 AM-0536-08-05	Al. Hélio Pinheiro, n.º 07 Resid. Sr. Valmir Castro	12:07	S 01° 21,906' W 48° 26,978'	14,0	Benzeno 0,278 Tolueno 0,389 Etilbenzeno 0,014 m, p- Xilenos 0,628 o-Xilenos 0,378 Xilenos total 1,006
06 AM-0536-08-06	Al. Hélio Pinheiro, 9 Resid. Sra. Maria de Fátima França Nascimento/ Oficina mecânica	12:24	S 010 21,914' W 480 26,982'	?	Benzeno 0,578 Tolueno 1,414 Etilbenzeno 0,118 m, p- Xilenos 1,915 o-Xilenos 1,001 Xilenos total 2,916
07 AM-0536-08-07	Al. Hélio Pinheiro, 43 Resid. Sra. Júlia Teixeira do Amaral	12:38	S 010 21,867' W 480 26,981'	14,0	Benzeno 0,957 Tolueno 3,765 Etilbenzeno 0,491 m, p- Xilenos 3,302 o-Xilenos 1,406 Xilenos total 4,708
08 AM-0536-08-08	Rod. Augusto Montenegro Km 05, s/n Posto Cristal Com. e Deriv. de Petróleo	12:41	S 010 21,869' W 480 26,973'	?	Benzeno 0,327 Tolueno 0,790 Etilbenzeno 0,073 m, p- Xilenos 1,117 o-Xilenos 0,599 Xilenos total 1,716

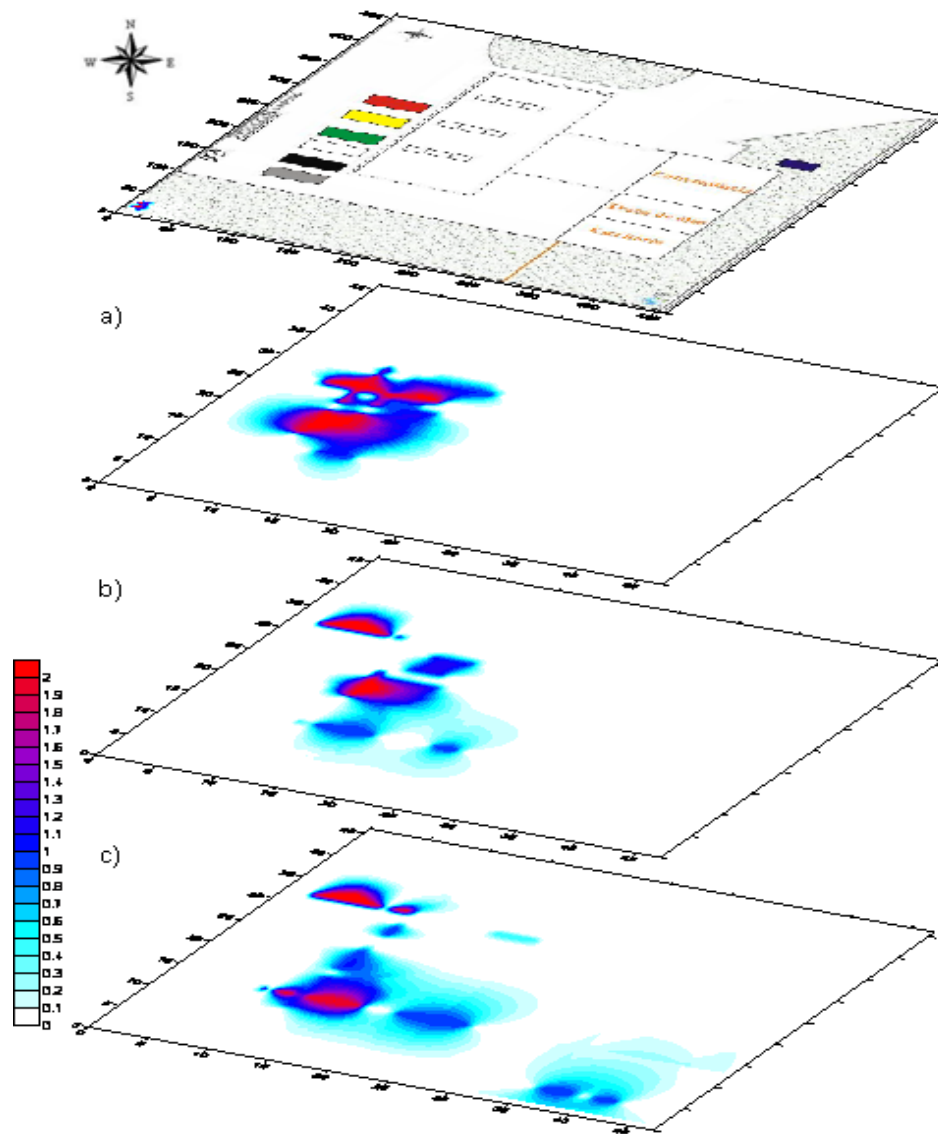
Fonte: (CEIMIC, 2009).

Figura 4.5 - Mapas de atenuações medidas com a antena de 200 MHz em dezembro de 2009.
Profundidades: a) 1 m, b) 2 m e c) 3 m.



Fonte: (REIS JUNIOR, 2009).

Figura 4.6 - Mapa de atenuações medidas com a antena de 200 MHz em março de 2009.
Profundidades: a) 1 m, b) 2 m e c) 3 m.



Fonte: (REIS JUNIOR, 2009).

5 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados foi guiada pelo interesse de se detectar a contaminação ao redor do Posto Cristal, mas teve como obstáculo a inexistência de travessas próximas aos fundos do posto, direção das residências onde foi detectada a presença de derivados de hidrocarbonetos nos poços de abastecimento de água.

5.1 GPR

A aquisição de dados GPR foi realizada no dia 16 de dezembro de 2008 ao longo de quatro ruas ao redor do Posto Cristal (Perfis 1, 2, 3 e 4) e no pátio de três residências que estão localizadas nas proximidades do posto (Perfis 5, 6 e 7). A Figura 4.1 mostra a localização dos perfis e as setas, a direção em que eles foram levantados. A Figura 5.1, por sua vez, mostra uma foto dos levantamentos em residência. Todos os perfis foram realizados sobre o solo, exceto os perfis 3 e 4 que foram realizados sobre calçamento com bloquetes.

O equipamento utilizado foi o modelo SIR (Subsurface Interface Radar) System-3000 da empresa Geophysical Survey Systems Inc (GSSI). Antenas (princípio biestático) de 200 MHz foram utilizadas com uma janela de tempo de 100 ns. As amostragens foram obtidas no tempo com o posicionamento das marcas a cada 10 m controlado por trena.

No dia 4 de março de 2009 foram realizadas novas medidas com a antena de 200 MHz, porém com a janela de tempo aumentada para 200 ns para investigar mais profundamente bem como as modificações causadas pelas chuvas. No entanto, mesmo com a janela aumentada, as informações dos perfis ficaram restritas a 4 m, devido à alta atenuação do sinal eletromagnético causada pela presença de argila abaixo de 3 m. Os dados coletados com a janela de tempo de 200 ns foram descartados.

Figura 5.1 – Levantamento com GPR realizado próximo a um poço de abastecimento domiciliar nos fundos do Posto Cristal



Fonte: Do autor

5.2 IP E ELETORRESISTIVIDADE

Os dados de IP e Eletorresistividade foram coletados em três residências que estão localizadas nas proximidades do posto Cristal (perfis 5, 6 e 7 da Figura 4.1). Em duas residências, onde a contaminação da água foi comprovada (amostras 1 e 4 da Tabela 4.2), foram obtidos os perfis 5 e 6, respectivamente. Na terceira residência não foi detectada contaminação, de modo que o perfil obtido, perfil 7, foi usado para comparação com os perfis 5 e 6. Também foi levantado o perfil 2, distante dos fundos do Posto, na passagem Rosa de Fátima, devido a relatos de moradores sobre odor e sabor de gasolina na água de poços residenciais. Nas demais ruas não foi possível realizar os levantamentos de IP/Eletorresistividade, porque elas estão revestidas com bloquetes.

O equipamento utilizado na coleta dos dados de IP/Eletrorresistividade foi o Imagedor de Resistividade e Polarização Induzida GeoTeste IRPI-1000, que opera no domínio do tempo, utilizando 20 eletrodos de cobre para a investigação de até sete níveis de investigação. Os eletrodos foram dispostos segundo o arranjo Wenner-Schlumberger; outros arranjos foram testados, como o dipolo-dipolo e o Wenner, mas os resultados mostraram-se inferiores. A investigação com o arranjo Wenner-Schlumberger foi conduzida para sete níveis, com pares contíguos de eletrodos distantes de 2 a 0,7 m, de acordo com o espaço no terreno das residências, o que proporcionou uma profundidade máxima nas pseudo-seções que variou de 6 a 2,5 m. Os trabalhos foram realizados nos dias 14 e 15 de dezembro de 2008. No dia 12 de janeiro de 2012 foi repetido o perfil 5 com a finalidade de se verificar se era possível obter resultados melhores, sem sucesso.

Figura 5.2 – Levantamento IP/Eletrorresistividade realizado em residência (Perfil 6).



Fonte: Do autor

6 INTERPRETAÇÃO

6.1 GPR

As figuras 6.1 a 6.7 reúnem os radargramas obtidos. Na porção superior dessas figuras é mostrado o radargrama bruto. Na porção intermediária, o radargrama após o processamento. Finalmente, na porção inferior dessas figuras, o radargrama processado com sua interpretação.

6.1.1 Radargrama GPR-1

O radargrama GPR-1 foi obtido ao longo dos 228 m do perfil 1 que se estende pela Alameda Hélio Pinheiro de Almeida, ao lado do posto Cristal, perpendicularmente a Rodovia Augusto Montenegro (Figura 6.1). Ele foi levantado no sentido Nordeste para Sudoeste. A alameda não é pavimentada.

Nos radargramas observa-se entre 10 e 44 m, bem como entre 72 e 90 m atenuação do sinal a partir de 2 m de profundidade. Em 100 e 130 m aproximadamente a 2 m de profundidade aparecem dois refletores hiperbólicos.

As zonas de baixa reflexão podem estar relacionadas a um maior conteúdo de argila em subsuperfície ou presença de lençol freático. Os refletores possivelmente representam tubulações.

6.1.2 Radargrama GPR-2

O radargrama GPR-2 foi levantado ao longo dos 66 m do perfil 2, que está localizado na passagem Rosa de Fátima atrás do posto, paralelo a Rodovia Augusto Montenegro (Figura 6. 2). Ele foi levantado no sentido Sudeste para Noroeste. A alameda não possui asfaltamento.

Os radargramas apresentam uma atenuação aproximadamente a 2,5 m de profundidade que se estende de 5 a 25 m no perfil, possivelmente relacionada a uma maior concentração de argila, e um refletor localizado a cerca de 30 m, 3 m de profundidade, que pode indicar a presença de tubulação.

6.1.3 Radargrama GPR-3

O radargramal GPR-3 foi obtido ao longo dos 252 m do perfil 3 que está localizado na Rua Custódio J. de Almeida, perpendicular a Rodovia Augusto Montenegro estendendo-se (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Ele foi levantado no sentido Sudoeste para Nordeste, sobre rua pavimentada com bloquetes.

Os radargramas apresentam zonas de atenuação que se entendem principalmente entre 2 e 44 m aproximadamente a 2 m de profundidade, entre 84 e 122 m, a 1 m de profundidade e de 130 a 250 m, a 2 m de profundidade possivelmente provocadas por uma maior concentração de argila. Um refletor hiperbólico a 10 m de distância, a cerca de 1 m de profundidade, indica provavelmente tubulação.

6.1.4 Radargrama GPR-4

O radargrama GPR-4 passa pelo calçamento cimentado de 54 m do perfil 4, localizado na Rodovia Augusto Montenegro, em frente ao posto cristal no sentido Noroeste para Sudeste (Figura 6.4). Trata-se do perfil mais próximo ao Posto, mas no sentido oposto à direção preferencial do fluxo de água, que é para oeste/sudoeste (ENSR, 2007).

Os radargramas apresentam uma zona de atenuação do sinal a 2,5 m de profundidade que se estende por todo perfil e um refletor hiperbólico a 36 m a cerca de 1,5 m de profundidade. O refletor revela possivelmente uma tubulação.

6.1.5 Radargrama GPR-5

O radargrama GPR-5 passa por 28 m do quintal de uma residência sito à Alameda Hélio Pinheiro de Almeida, nº40, a Sul do Posto (vide perfil 5 da Figura 6.5). O poço da residência apresentou contaminação comprovada segundo a análise de água (amostra 04 da Tabela 4.2). O perfil foi levantado no sentido Sudeste para Noroeste em um local sem pavimentação, mas com a presença de árvores.

Figura 6.1 - Radargrama GPR-1: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado.

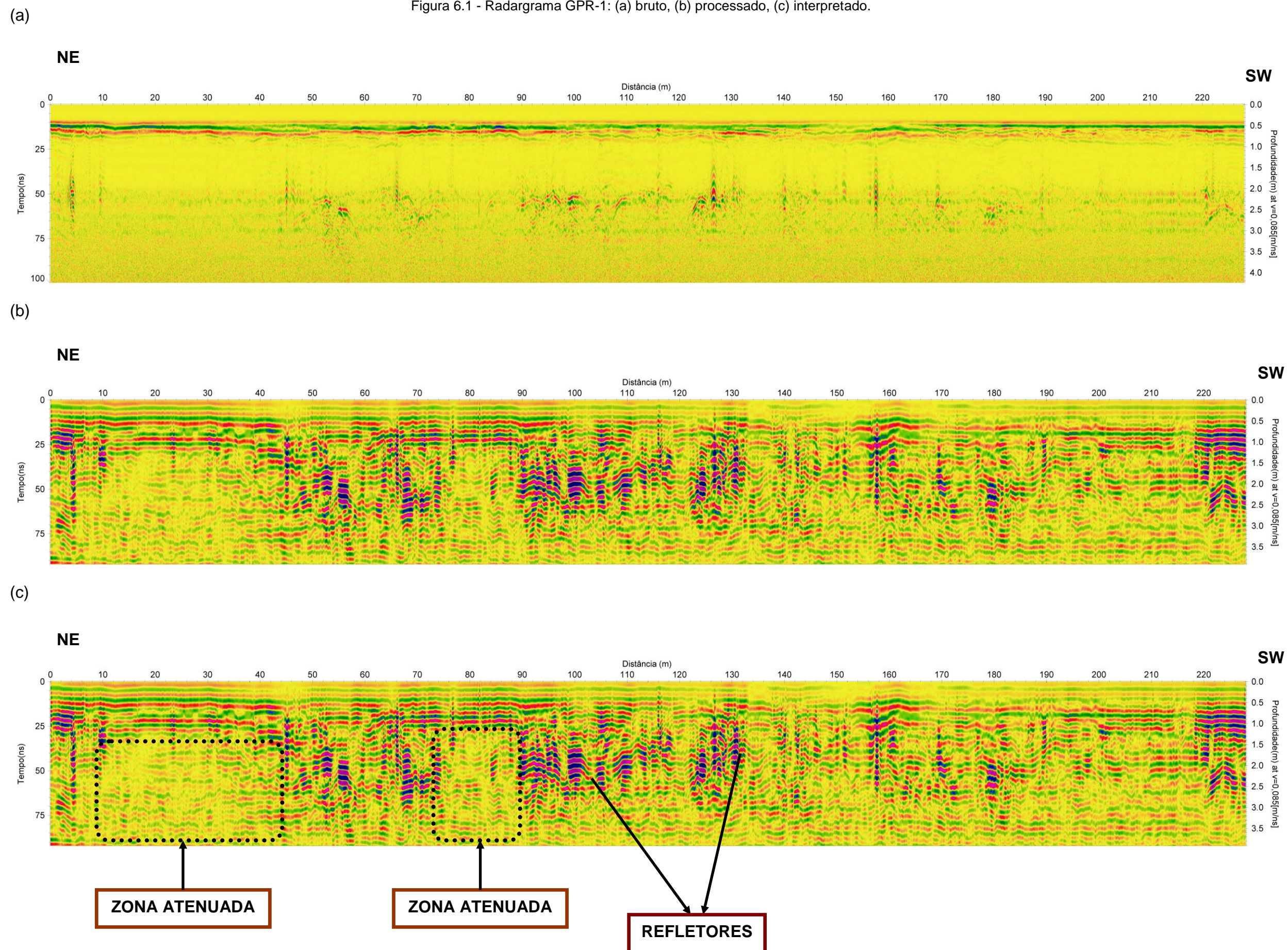


Figura 6.2 –Radargrama GPR-2: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado.

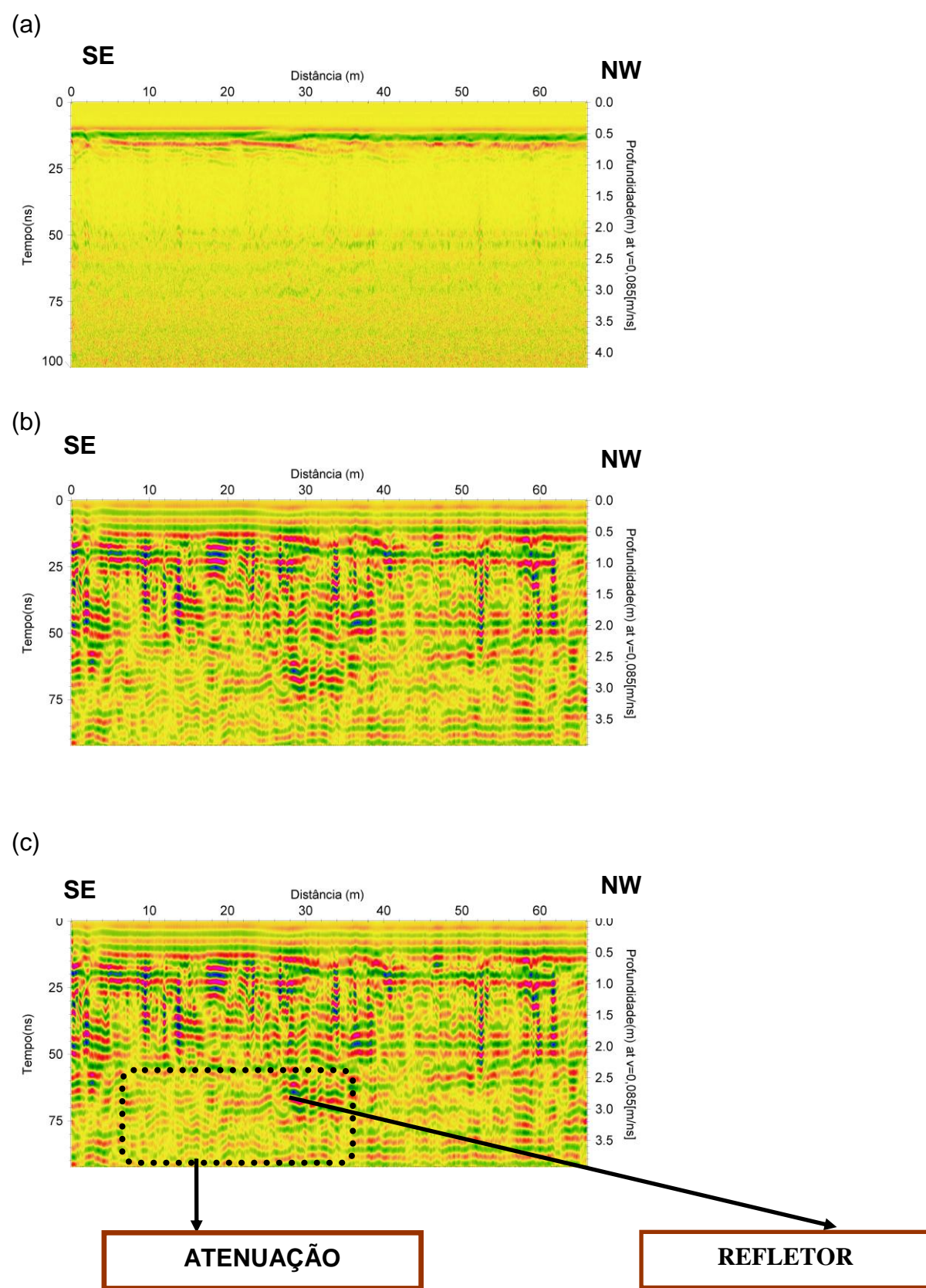


Figura 6.3- Radargrama GPR-3: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado.

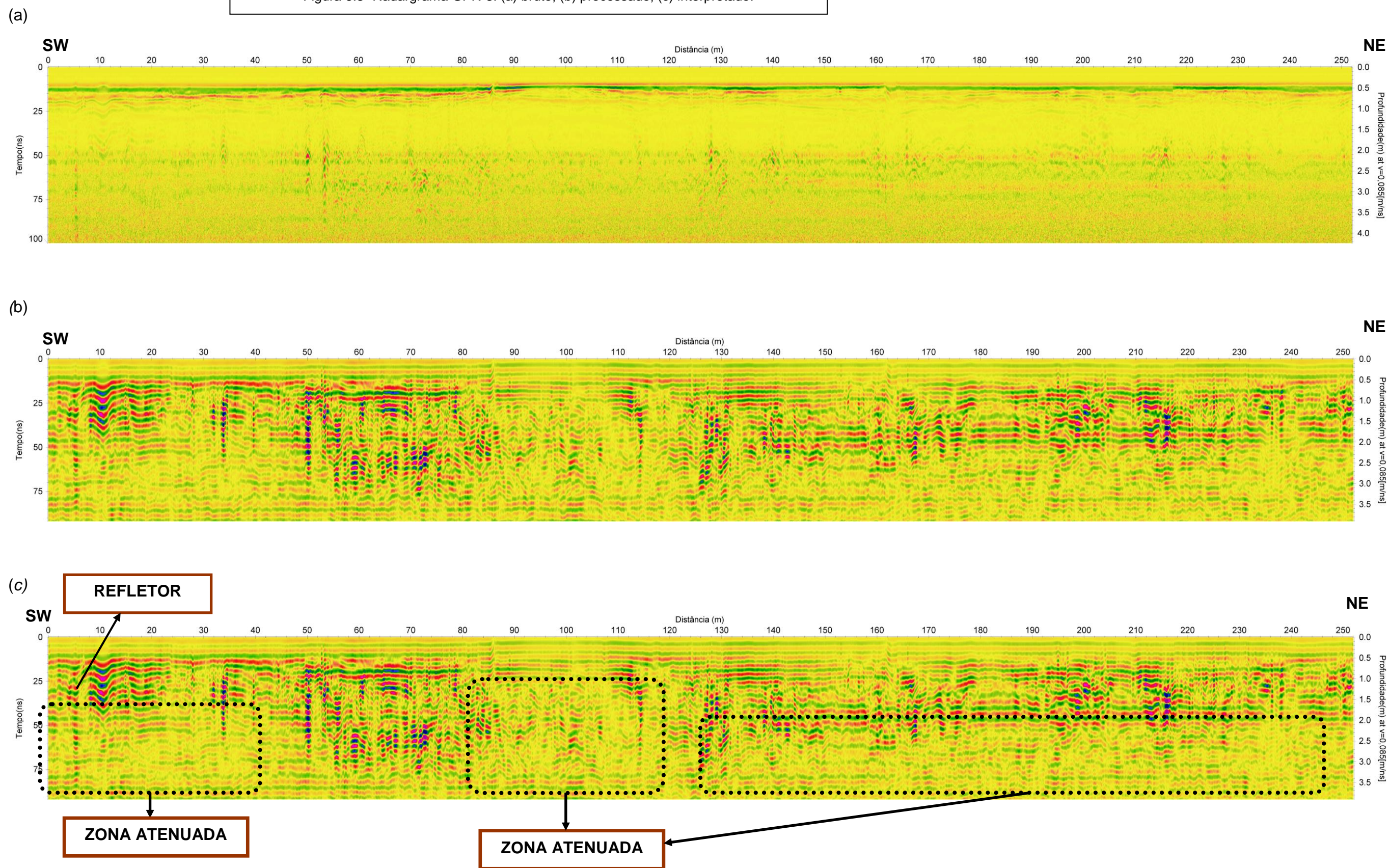


Figura 6.4- Radargrama GPR-4: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado

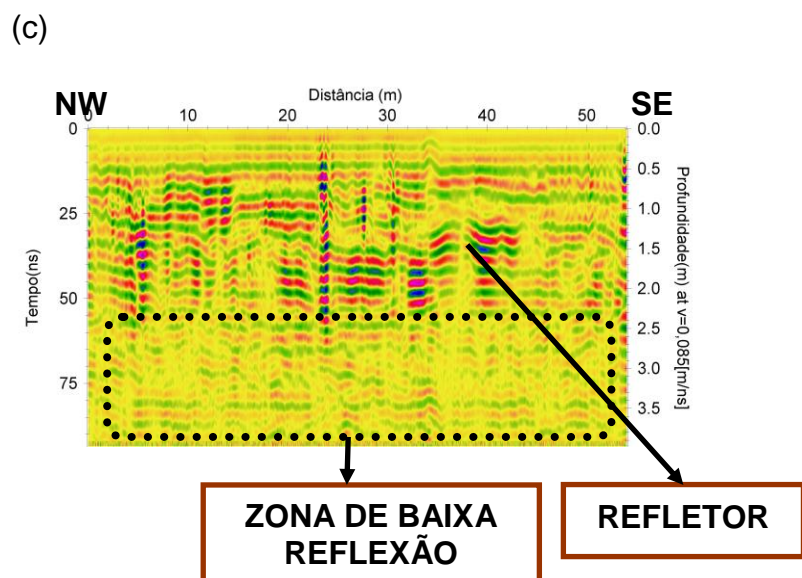
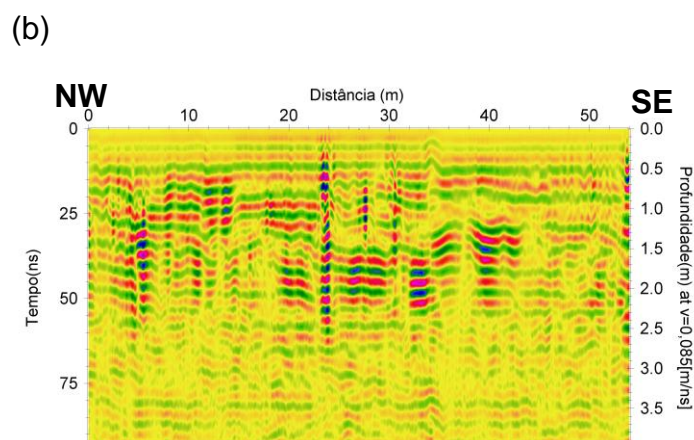
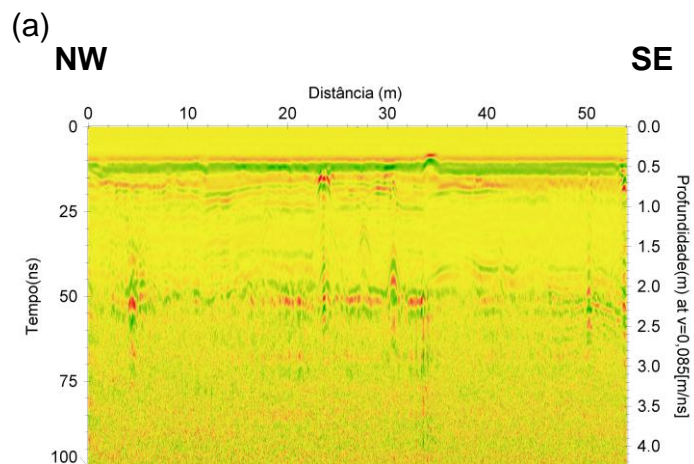
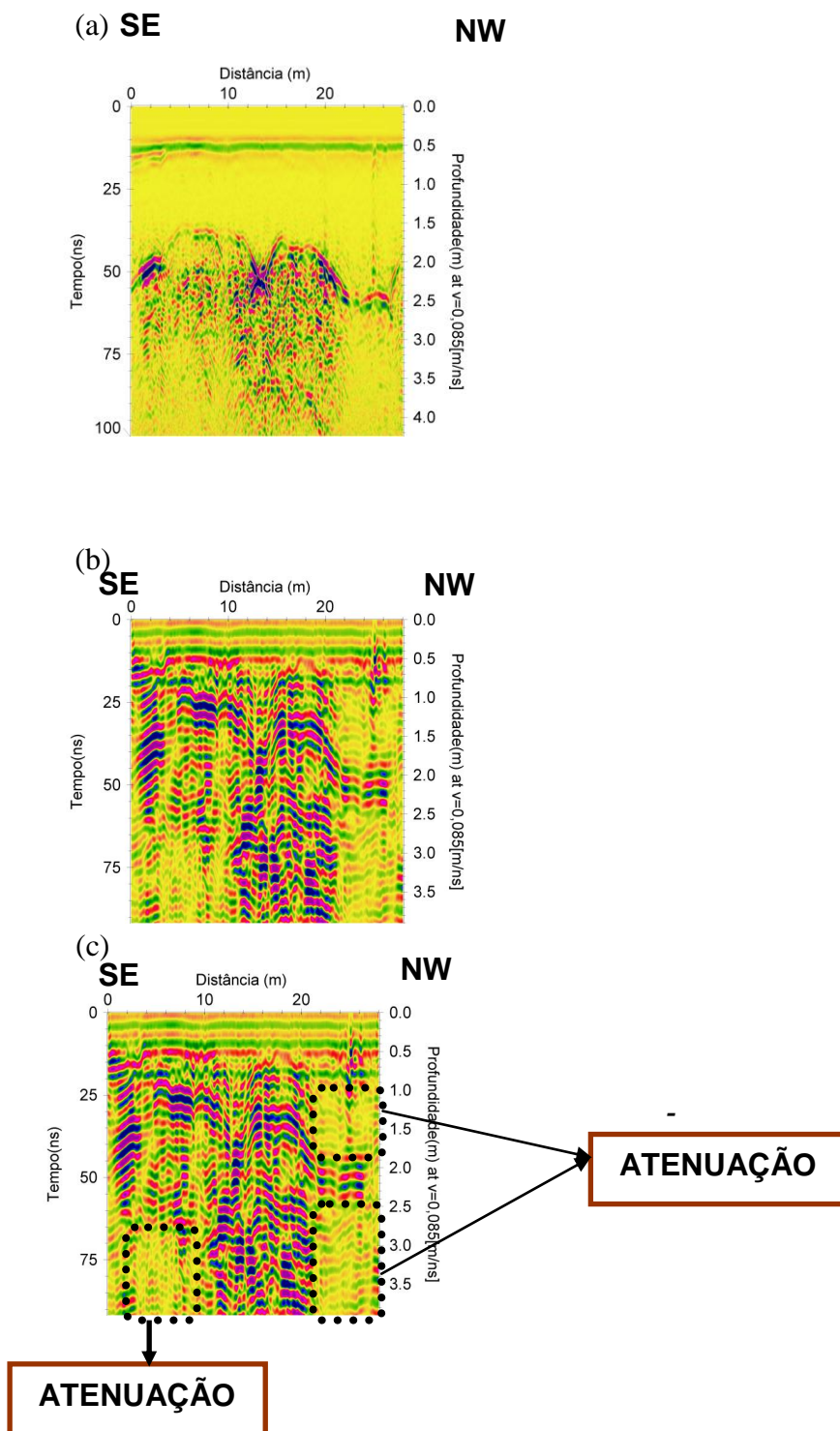


Figura 6.5 Radargrama GPR-5: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado.



O perfil apresenta algumas zonas de baixa reflexão intensa, entre cerca de 2 e 10 m a 2,75 m de profundidade, bem como duas atenuações entre 20 e 28 m de distância a cerca de 1 e 1,75 m de profundidade e a partir de 2,5 m de profundidade, todas sugestivas de um aumento na condutividade.

6.1.6 Radargrama GPR-6

O radargrama GPR-6 foi levantado de Sudeste para Noroeste sobre 12 m do gramado de uma residência localizada na Al. José Custódio de Almeida, nº 3, a sudoeste do Posto Cristal (perfil 6 da Figura 6.6). A análise da água do poço da residência apresentou contaminação por BTEX (amostra 04 da Tabela 4.2).

Os radargramas revelam duas zonas com uma certa redução de reflexão, que podem representar um aumento na condutividade.

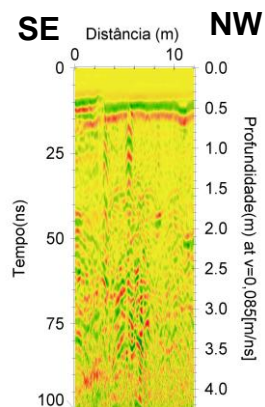
6.1.7 Radargrama GPR-7

O radargrama GPR-7 foi levantado de Sudeste para Noroeste em cerca de 40 m em zona não pavimentada da propriedade situada à Rua Custódio J. de Almeida, nº 27 (perfil 7 da Figura 6.7). Os efeitos no local do derramamento de hidrocarbonetos sobre o subsolo foram considerados improváveis baseando-se em análise de água e relato de moradores. O perfil serve, portanto, para se ter uma referência de background (BG).

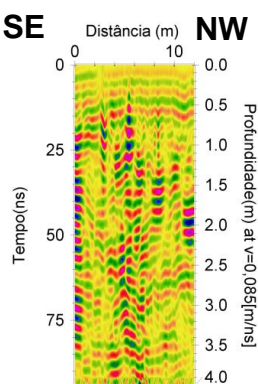
Os radargramas apresentam uma zona de boa reflexão entre 4 e 18 m a aproximadamente a 0,5 m de profundidade e um refletor hiperbólico a 26 m a 1 m de profundidade.

Figura 6.6- Radargrama GPR-6: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado.

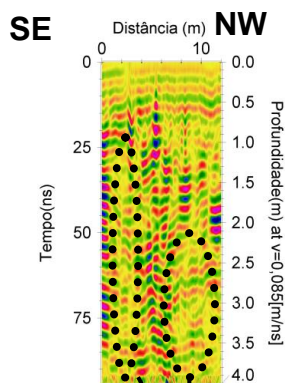
(a)



(b)

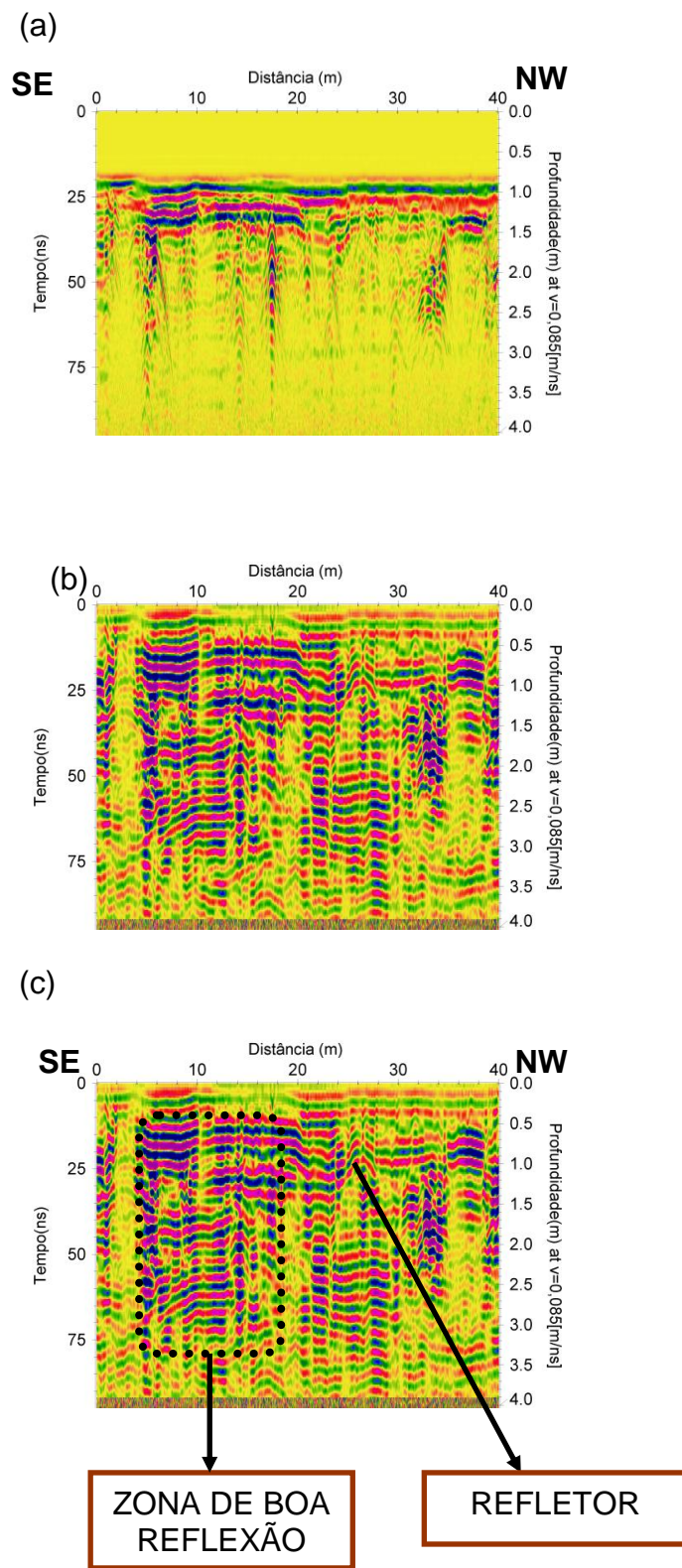


(c)



**ZONAS DE BAIXA REFLEXÃO
(POUCO INTENSA)**

Figura 6.7 – Radargrama GPR-7: (a) bruto, (b) processado, (c) interpretado.



6.2 IP E ELETORRESISTIVIDADE

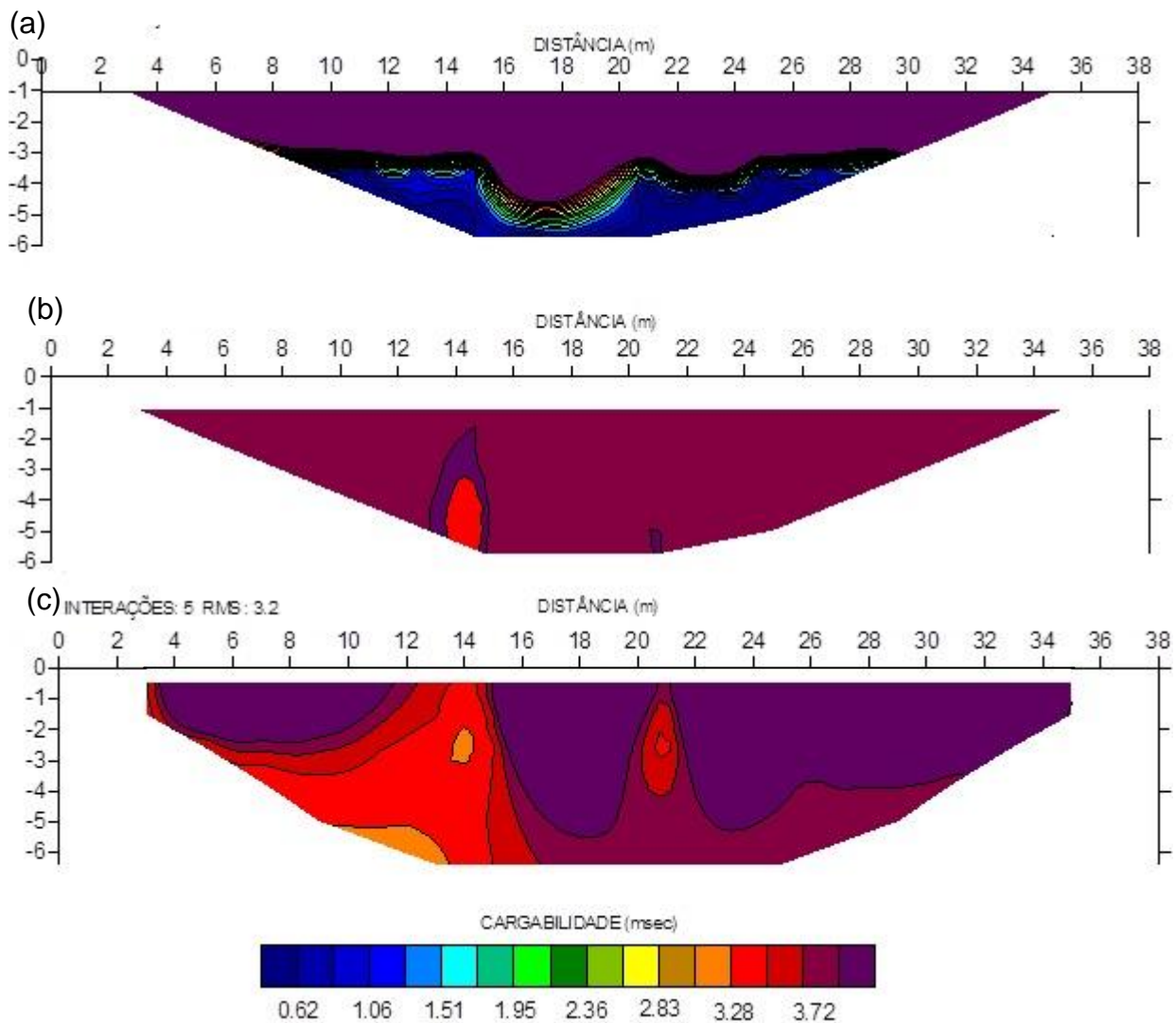
As pseudo-seções de IP e Eletorresistividade receberam numeração em consonância com os perfis sobre os quais foram obtidos. As pseudo-seções de IP são apresentadas nas figuras 6.8 a 6.11, enquanto as de Eletorresistividade, nas figuras 6.12 a 6.15. No eixo das abscissas das figuras é dada a distância no perfil e no eixo das ordenadas, a pseudo-profundidade. Contornados aparecem isovalores de cargabilidade nas pseudo-seções de IP e isovalores de resistividade nas pseudo-seções de Eletorresistividade. Cada figura compreende a pseudo-seção medida no campo, a pseudo-seção de valores calculados (ou seja, a pseudo-seção que seria obtida no campo para o modelo-solução obtido por meio da inversão) e o modelo em seção que representa a solução da inversão realizada (isto é, o modelo físico obtido para a propriedade considerada). Foi estabelecida a mesma escala de cargabilidade para todas as pseudo-seções de IP bem como de resistividade para as pseudo-seções de resistividade, para facilitar a comparação dos resultados.

6.2.1 Pseudo-Seção IP-2

A pseudo-seção 2 foi medida sobre 38 m da Passagem Rosa de Fátima sobre parte do perfil 2, com o seu início muito próximo ao cruzamento do perfil 2 com o perfil 3, em local não asfaltado. Foi usado um espaçamento de eletrodos de 2 m, o que permitiu uma profundidade de investigação de aproximadamente 6 m.

Como a figura 6.8 mostra, a pseudo-seção de IP obtida para o perfil apresenta uma zona de maior cargabilidade na parte superior do perfil e menor cargabilidade na parte inferior, não apresentando anomalias laterais significativas. A solução da inversão produz medidas sintéticas que divergem das medidas de campo, logo, essa solução, não é um modelo plausível para a subsuperfície.

Figura 6.8 – Pseudo-seções IP-2: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão.



6.2.2 Pseudo-Seção IP-5

A pseudo-seção IP-5 possui 28,5 m sobre o perfil 5. Foi obtido dentro do terreno da residência situada na Alameda Hélio Pinheiro de Almeida, nº40, a SW do Posto (Figura 6.5), cuja amostra do poço de água apresentou-se contaminada. O espaçamento de eletrodos utilizado foi de 1,5 m, que forneceu uma profundidade máxima de investigação na pseudo-seção de 4 m.

A pseudo-seção de IP calculada é muito semelhante à pseudo-seção de IP construída com os dados medidos, logo o modelo obtido com a inversão pode ser considerado uma solução ao problema de inversão.

6.2.3 Pseudo-Seção IP-6

A pseudo-seção IP-6 possui apenas 13,3 m e uma profundidade de investigação máxima de aproximadamente 2,5 m. Ele foi obtido dentro do quintal de uma residência localizada à Al. José Custódio de Almeida, Nº 3, com espaçamento de 0,7 m entre cada par de eletrodos vizinhos, para se poder compor o arranjo de 20 eletrodos dentro de extensão exígua.

As medidas mostradas na figura 6.10 também apresentam variações laterais na cargabilidade: uma região de baixa cargabilidade aparece no perfil entre 7,0 e 8,4 m. A pseudo-seção calculada é muito semelhante à pseudo-seção medida e o desvio médio padrão muito pequeno, conseqüentemente o modelo obtido com a inversão é uma solução satisfatória.

6.2.4 Pseudo-Seção IP-7

A pseudo-seção IP-7 possui 38 m em terreno à Rua Custódio J. de Almeida, nº 27, onde os efeitos do derramamento de hidrocarbonetos sobre o subsolo foram considerados improváveis, servindo pois como referência do BG. Foi usado um espaçamento de eletrodos de 2 m, de modo que a profundidade na pseudo-seção vai até cerca de 6 m.

Figura 6.9 – Pseudo-seções IP-5: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão.

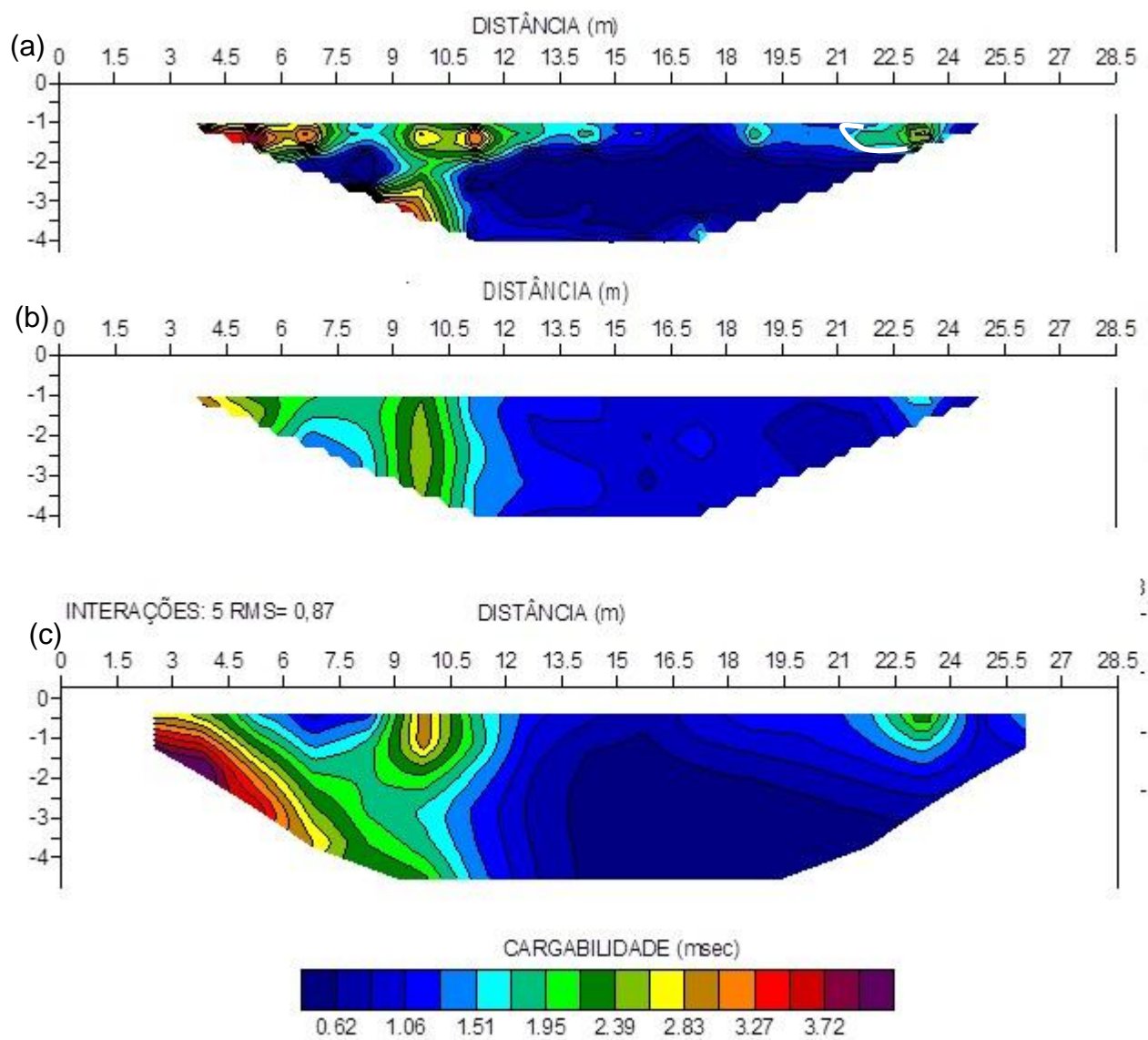
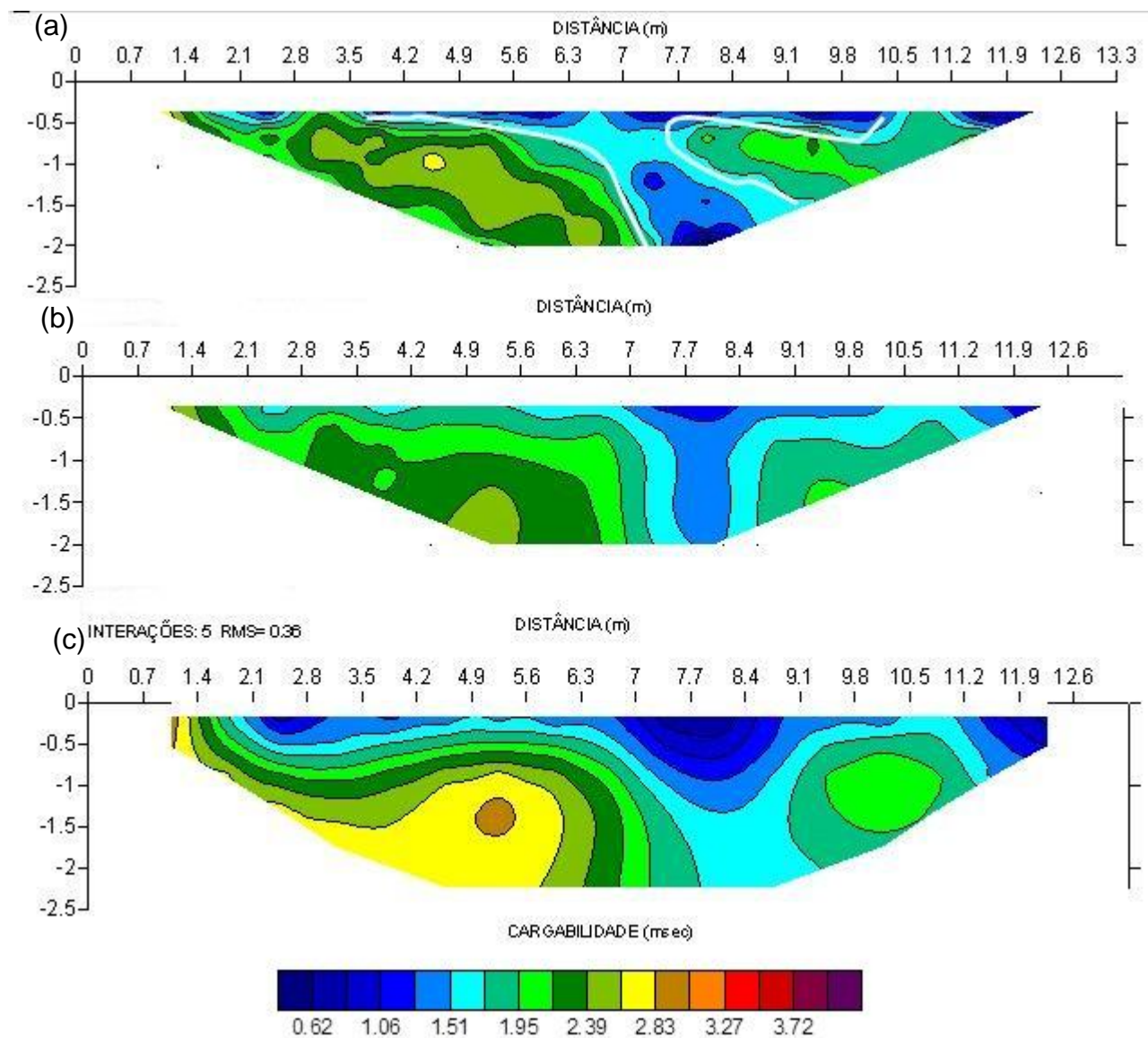


Figura 6.10 – Pseudo-seções IP-6: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão.



O local apresentava umas construções recentes tendo seu solo sido removido, o que pode ter modificado suas características geológicas mais superficiais.

A pseudo-seção medida e a calculada apresentam algum ajuste, de modo que o modelo físico obtido com a inversão mostrando uma terra acamada (com pequenas heterogeneidades), cuja cargabilidade cai com a profundidade, pode ser parcialmente aceito.

6.2.5 Pseudo-Seção Eletorresistividade-2

A figura 6.12 não apresenta descontinuidades laterais de resistividade aparente. Até cerca de 3,5 m de profundidade desenvolve-se uma zona mais condutiva. Abaixo de 3,5 m ocorre uma zona mais resistiva. O modelo físico solução do problema de inversão deve ser considerado um modelo muito aproximado devido ao ajuste restrito entre a pseudo-seção medida e a calculada.

6.2.6 Pseudo-Seção Eletorresistividade-5

A pseudo-seção medida mostrada na Figura 6.13 apresenta variações laterais na resistividade. O mesmo ocorreu com a seção de cargabilidade analisada anteriormente. A pseudo-seção calculada é muito semelhante à medida, logo o modelo obtido com a inversão pode ser considerado uma solução algo satisfatória ao problema de inversão. Medida posterior no local, em janeiro de 2012, não permitiu obter rms inferior.

6.2.7 Pseudo-Seção Eletorresistividade-6

Variações laterais de resistividade inferiores às descritas para o perfil anterior são encontradas na Figura 6.14. A solução da inversão fornece medidas que mostram-se relativamente ajustadas às medidas de campo, logo, ela pode ser aceita como um modelo de subsuperfície para o perfil. Esse modelo mostra uma camada rasa resistiva sobre uma camada levemente condutiva, que descansaria sobre material resistivo.

Figura 6.11 – Pseudo-seções IP-7: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão.

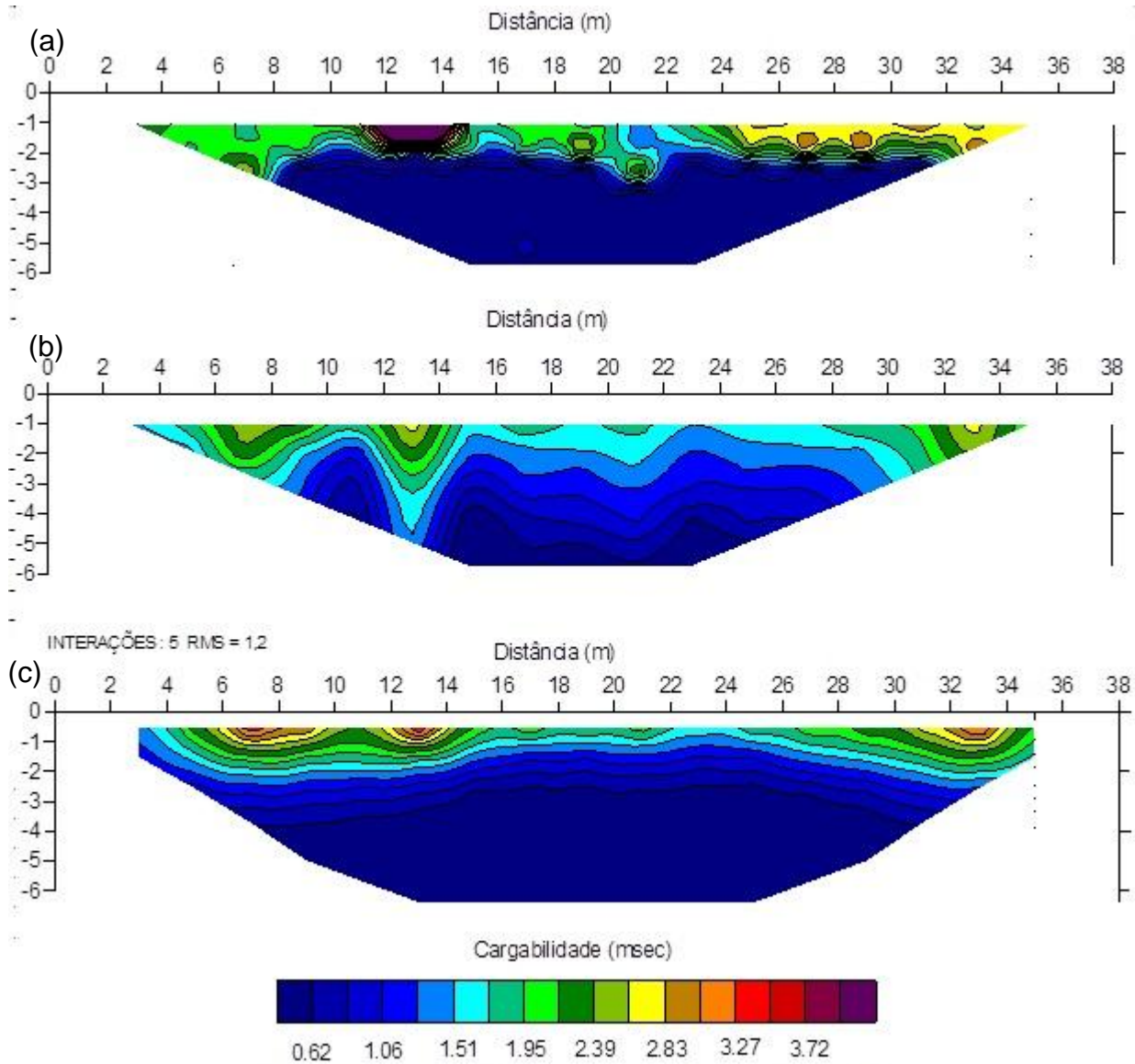
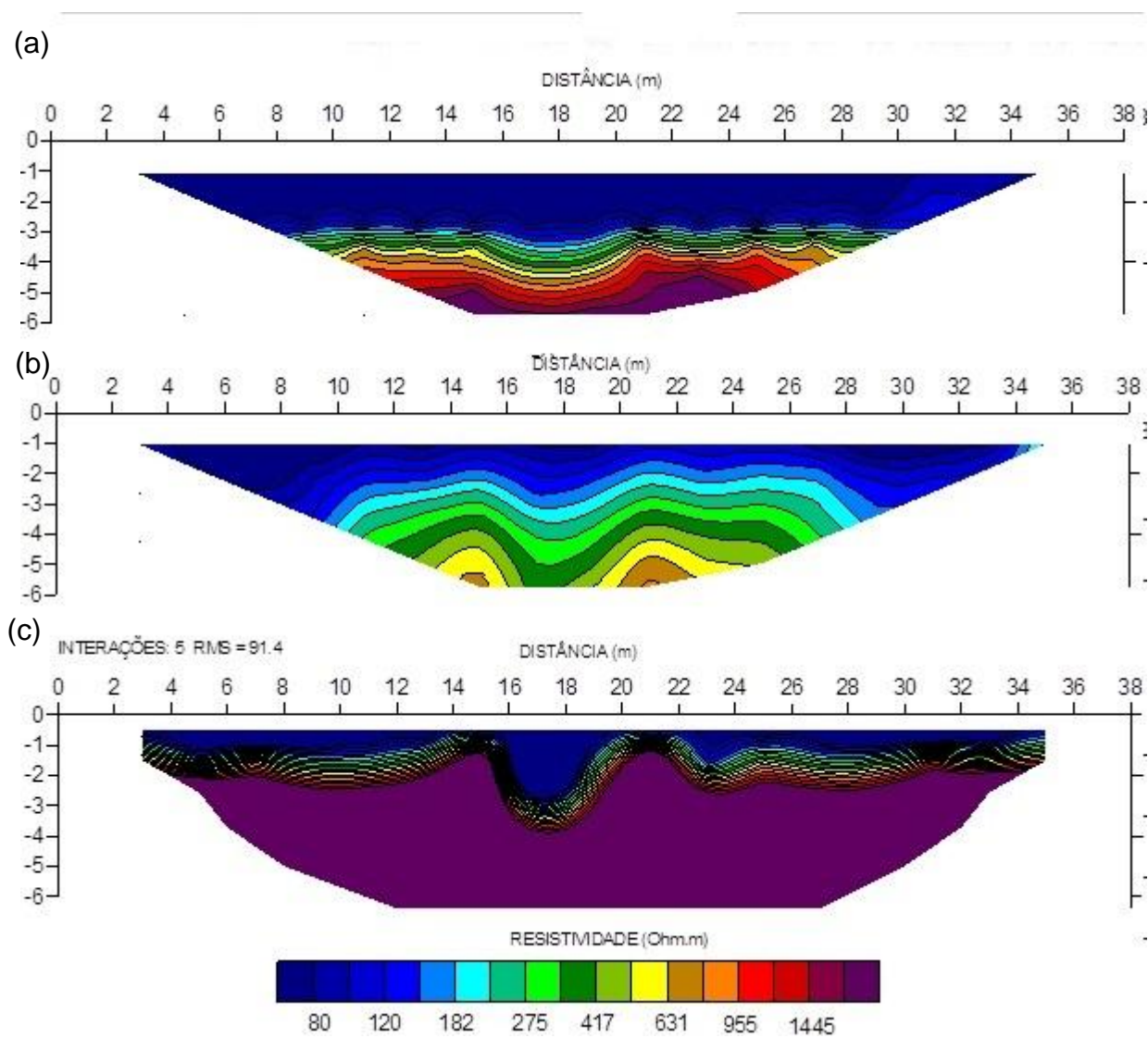


Figura 6.12 – Pseudo- seções de eletrorresistividade 2: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão.



6.2.8 Pseudo-Seção Eletroresistividade-7

A seção de resistividade aparente não apresentam variações laterais significativas (Figura 6.15). O modelo físico invertido é consiste, já que há um ajuste de dados medidos e dados calculados razoáveis. Como esse é o perfil sendo usado como referência, pode-se dizer que o modelo da subsuperfície é aproximadamente acamado e pode ter uma camada algo condutiva intermediária.

Figura 6.13 – Pseudo- seções de eletrorresistividade 5: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão

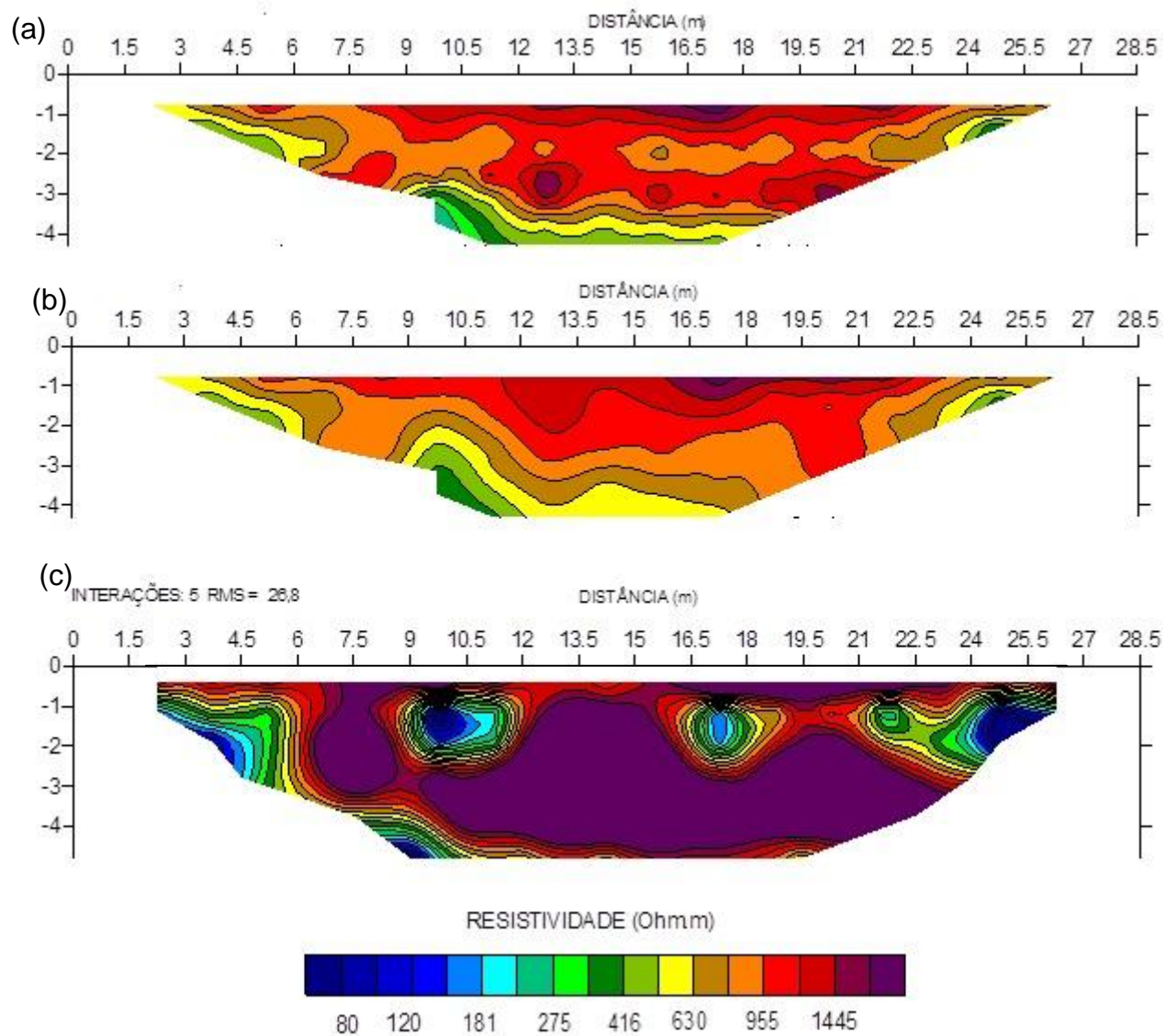


Figura 6.14 – Pseudo- seções de eletrorresistividade 6: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão. As linhas brancas limitam zonas de condutividade mais elevada.

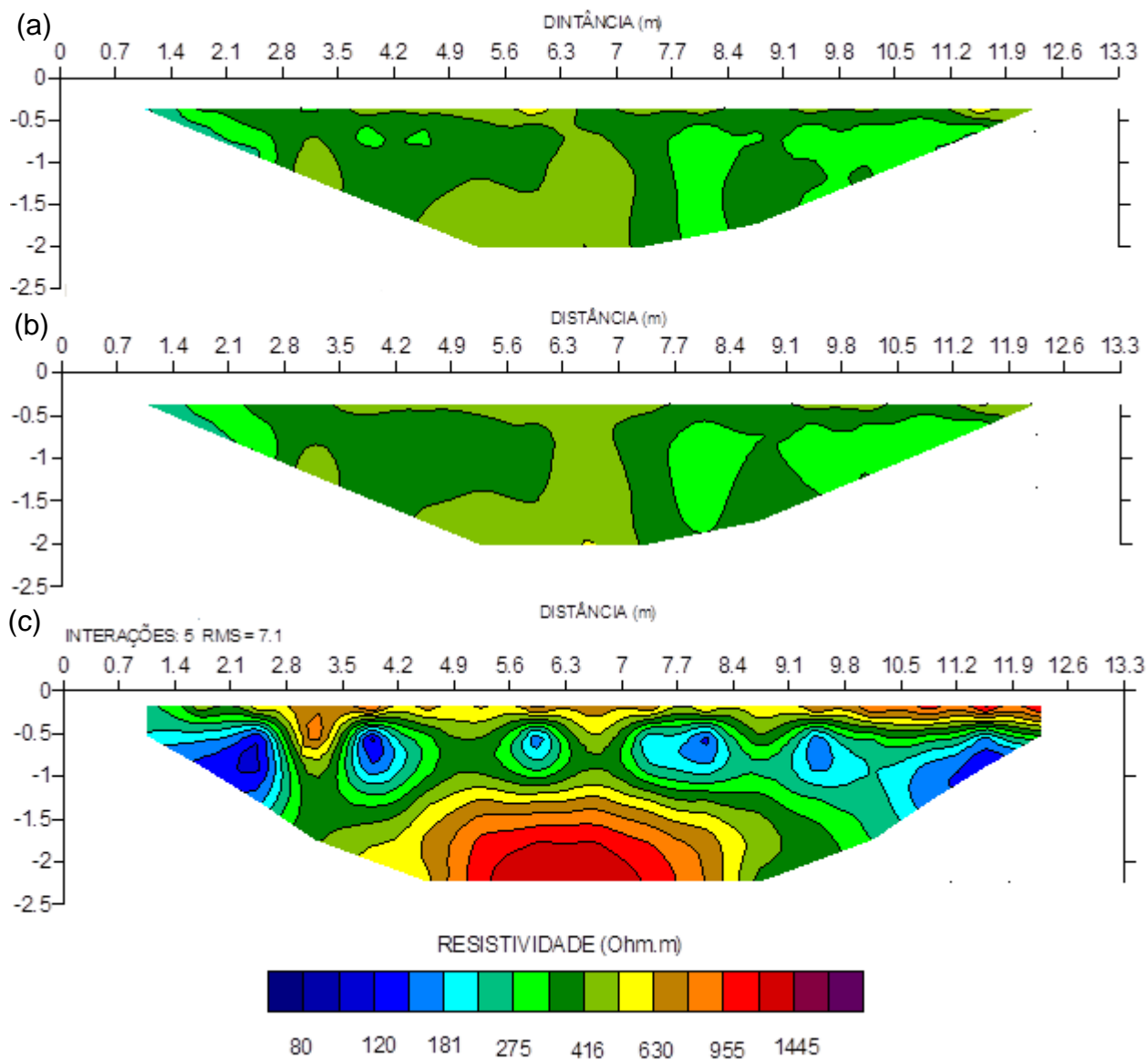
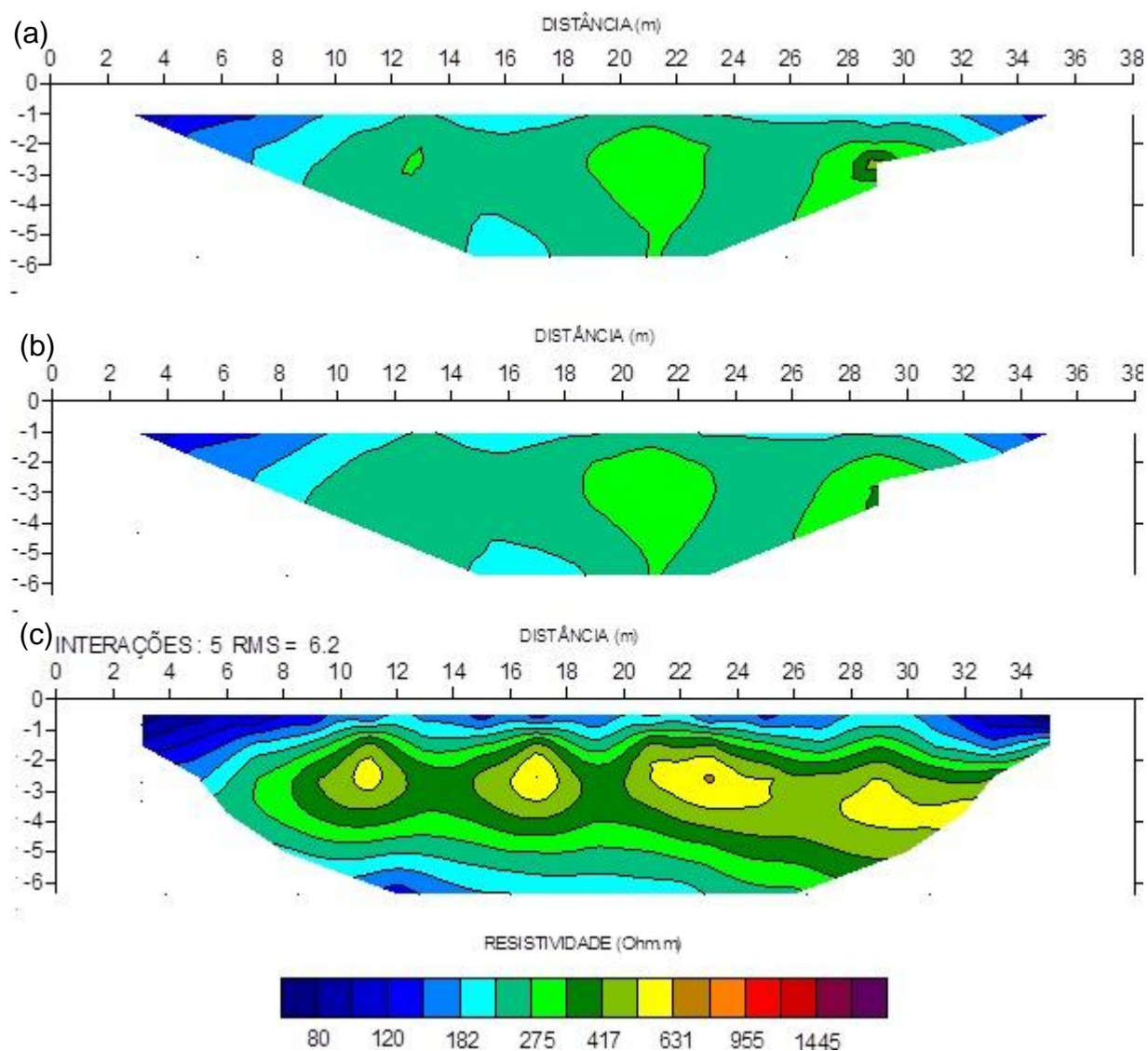


Figura 6.15 – Pseudo- seções de eletrorresistividade 7: (a) dados de campo, (b) dados que seriam obtidos no campo para (c) o modelo físico obtido por meio da inversão.



6.3 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

Para facilitar a integração dos resultados, são aqui destacados os aspectos mais importantes vistos anteriormente em detalhe. Além disso, para os perfis 2, 5, 6 e 7 levam-

tados por mais de um método, são reunidos todos os resultados nas figuras 6.16, 6.17, 6.18, e 6.19, respectivamente, para facilitar a interpretação integrada dos mesmos.

O perfil 1, levantado apenas com o GPR, apresentou duas zonas extensas (entre 10 e 44 m e entre 72 e 90 m) com atenuação a partir de 2 m de profundidade que pode ser indicativa da presença de argila ou do lençol freático, devido à grande extensão dessas zonas.

O perfil 2, por sua vez, também forneceu atenuação nos radargramas entre 5 e 25 m a 2,5 m de profundidade. Até cerca de 3,5 m de profundidade desenvolve-se uma zona mais condutiva, a qual corresponde uma zona de maior cargabilidade. Abaixo de 3,5 m ocorre uma zona mais resistiva, a qual se relaciona uma zona de menor cargabilidade. Os resultados não cobrem as mesmas profundidades. No entanto, pode-se supor que a subsuperfície até cerca de 3,5 m de profundidade é mais rica em argila, com heterogeneidades locais, do que a porção abaixo de 3,5 m, que apresentaria uma maior quantidade de areia.

O perfil 3 apresenta também zonas de atenuação do sinal do GPR (entre 2 e 44 m a cerca de 2m de profundidade, entre 84 e 122 m, a 1 m de profundidade e de 130 a 250 m, a 2 m de profundidade). A explicação mais provável para essa atenuação seria também uma maior concentração de argila.

O perfil 4 apresenta atenuação do sinal do GPR a 2,5 m de profundidade por todo o perfil. Por ser extensa bem como guardar analogia com a atenuação que ocorre no perfil 3 entre 130 e 250 m, pode ser causada por uma maior concentração de argila. É interessante observar que ao norte do Perfil GPR-1 também ocorre uma extensa zona de atenuação, porém a uma profundidade mais rasa, que deve corresponder ao mesmo pacote rico em argila.

O perfil 5 apresenta zonas de baixa reflexão do sinal do GPR, entre 2 e 10 m a 2,75 m de profundidade, como também atenuações entre 20 e 28 m de distancia a cerca de 1 e 1,75 m de profundidade e a partir de 2,5 m de profundidade. É possível que haja alguma relação entre essas zonas de atenuação e aquela mais a sudeste do posto mostrada nas Figuras 4.5 e 4.6, na profundidade de 3 m, porque a direção preferencial de fluxo se dá para oeste/sudoeste (ENSR, 2007). A pseudo-seção medida mostrada na

Figura 6.9 apresenta variações laterais na cargabilidade: um alto aparece à esquerda do perfil (SE) bem como no topo do lado direito (NW), cercando zona de baixa cargabilidade. Esses altos de cargabilidade ocorrem sobre zonas de atenuação dos radargramas da Figura 6.5 e sobre a zona de atenuação apresentada na Figura 4.5. A pseudo-seção de resistividade evidencia zonas condutivas às quais corresponde muitas vezes zonas de alta cargabilidade, que guardam correspondência com as zonas de atenuação dos radargramas apresentados na Figura 6.5 bem como com a zona de atenuação apresentada na Figura 4.5. Pode-se supor que se trate de zonas com a fase residual do vazamento.

O perfil 6 apresenta duas zonas de atenuação do sinal do GPR. Dada à proximidade ao posto, é provável que haja alguma relação entre essas zonas de atenuação e aquela mais a oeste do posto mostrada nas Figuras 4.5 e 4.6, nas profundidades de 1, 2 e 3 m, considerando que a direção preferencial de fluxo se dá para oeste/sudoeste (ENSR, 2007). Os resultados de IP e Eletrorresistividade são de porção superior do radargrama, onde aparece uma certa atenuação. O IP mostra uma região de baixa cargabilidade aparece no perfil entre 7,0 e 8,4 m, a eletrorresistividade, uma camada condutiva intermediária.

O perfil 7 apresenta zonas de boa reflexão do sinal GPR entre 4 e 18 m a aproximadamente a 0,5 m de profundidade, provavelmente causadas por uma maior concentração de areia ou ao enriquecimento em concreções ferruginosas. Zonas atenuadas aparecem de forma muito limitada, mas o principal motivo pode ser a ocorrência restrita de argila neste local. A cargabilidade é relativamente elevada até 2,5 m de profundidade e, abaixo dessa profundidade, cai. A resistividade, por sua vez, evidencia uma terra acamada com uma camada condutiva intermediária. Comparando-se esse resultado ao obtido com o GPR, observa-se que a zona de cargabilidade baixa tem uma certa correspondência com a zona de atenuação em profundidade. Como esse é o perfil usado como referência, pode-se dizer que o modelo da subsuperfície é aproximadamente acamado, não apresentando descontinuidades laterais de resistividade significativas.

Figura 6.16 – Perfil 2: (a) localização; resultados de (b) GPR, (c) IP e (d) Eletrorresistividade.

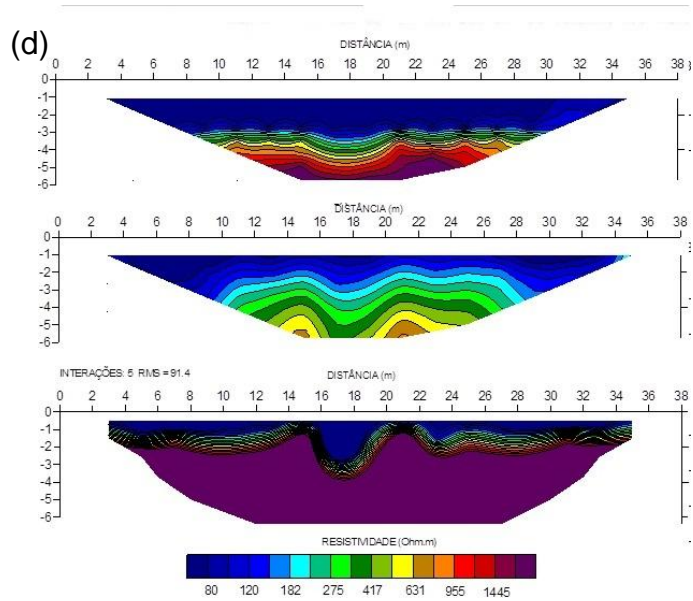
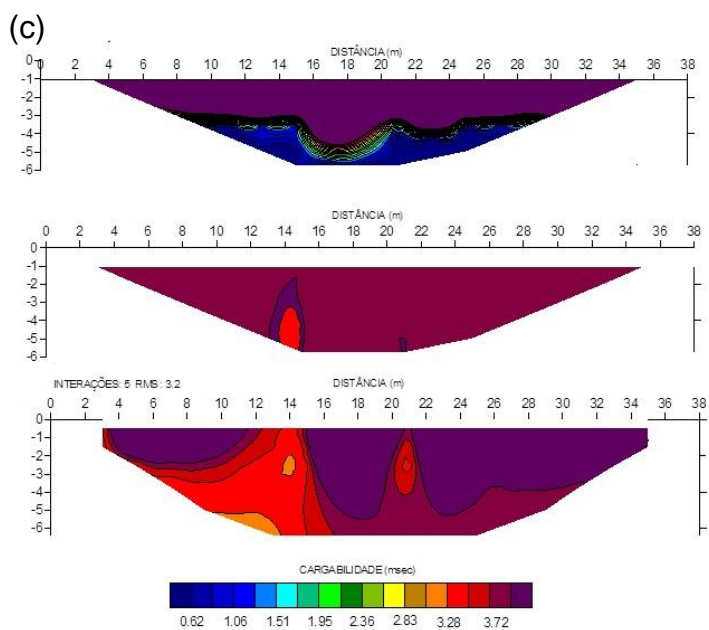
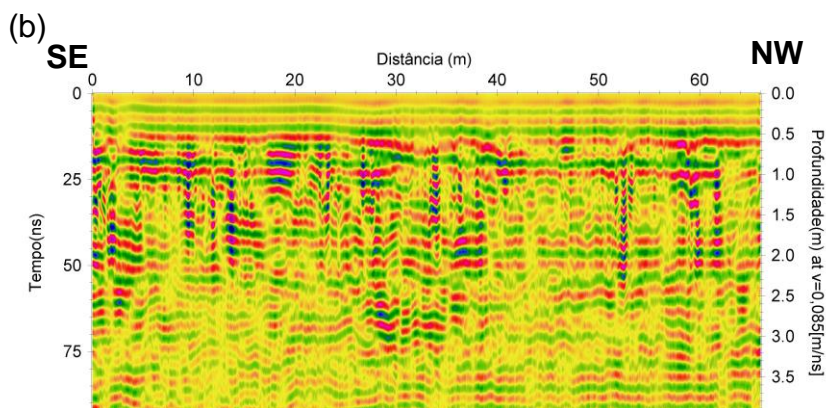


Figura 6.17 – Perfil 5: (a) localização; resultados de (b) GPR, (c) IP e (d) Eletrorresistividade

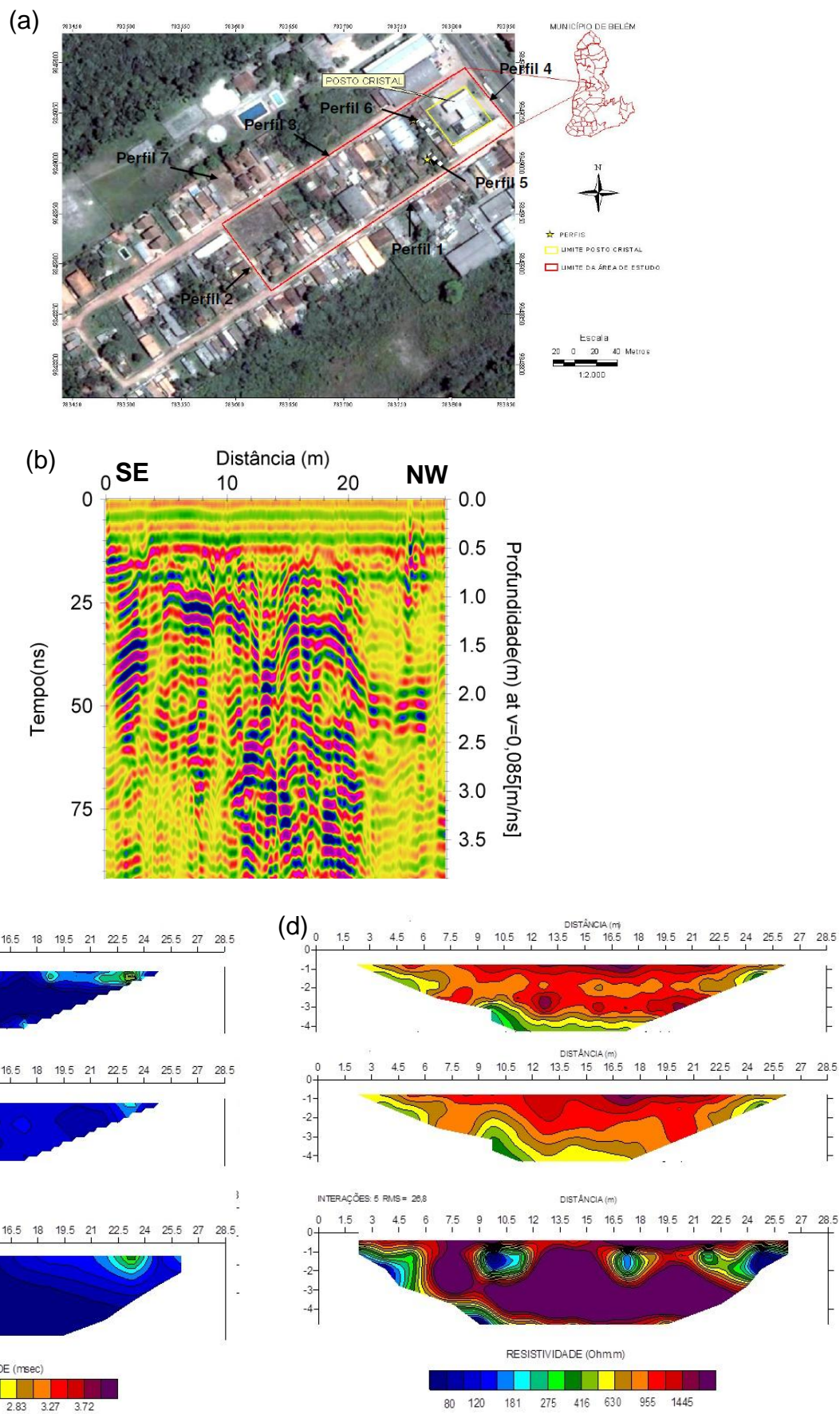


Figura 6.18 – Perfil 6: (a) localização; resultados de (b) GPR, (c) IP e (d) Eletrorresistividade.

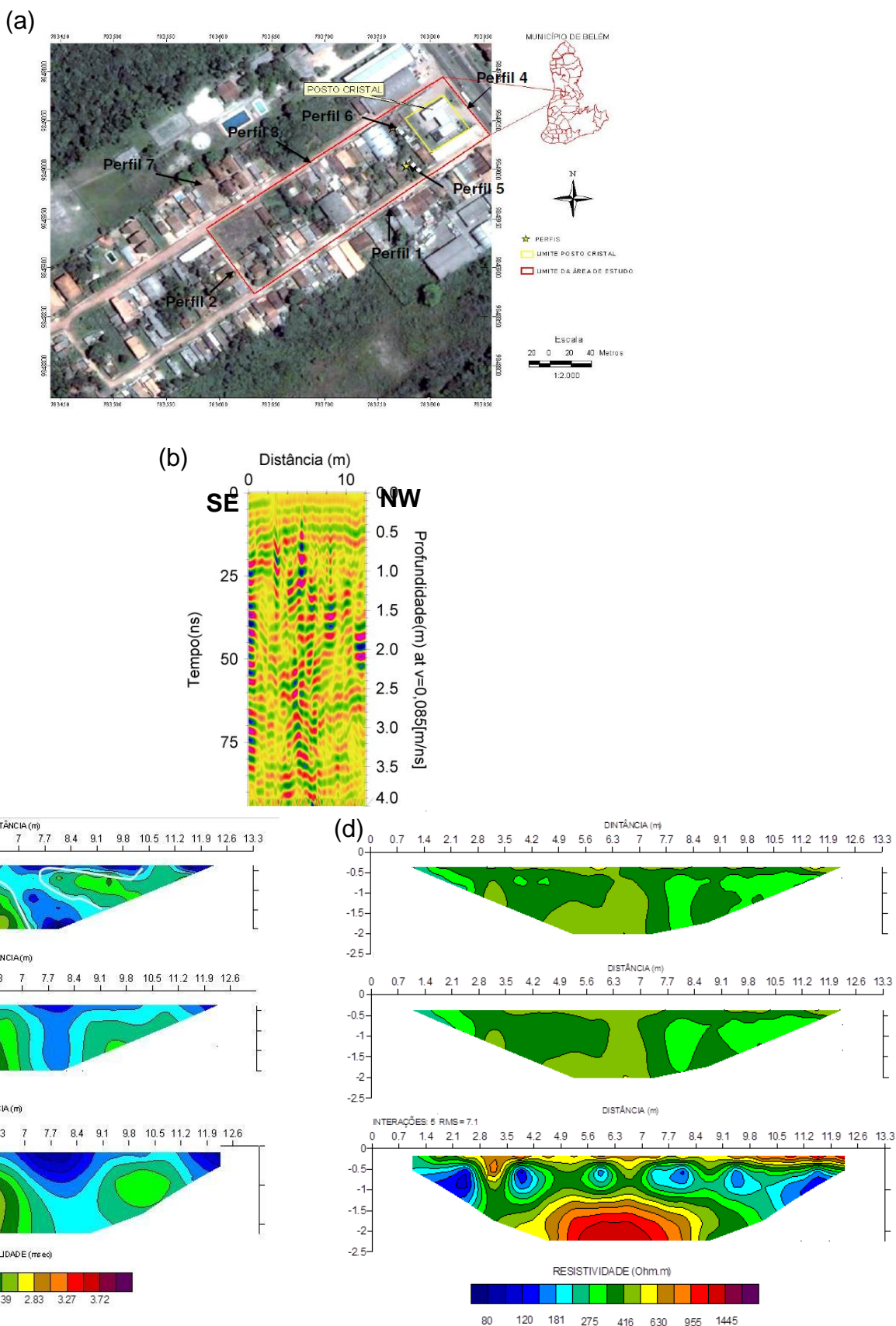
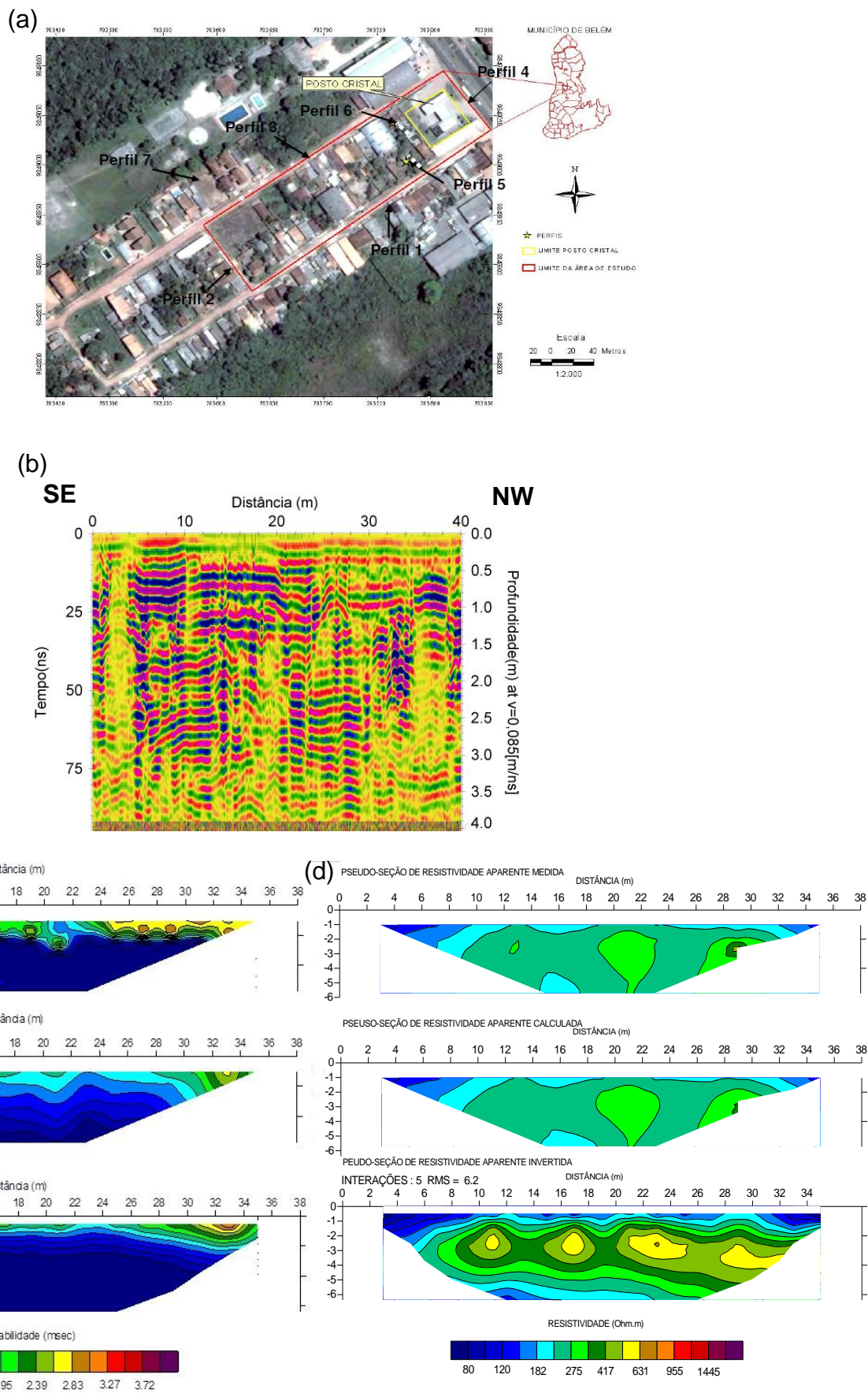


Figura 6.19 – Perfil 7: (a) localização; resultados de (b) GPR, (c) IP e (d) Eletrorresistividade.



7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os derivados de petróleo apresentam elevada resistividade. Quando derramados no terreno provocam, portanto, anomalias resistivas. Com o passar do tempo, no entanto, a ação de bactérias produz a biodegradação desses compostos orgânicos leva à formação de ácidos que dissolvem íons presentes no subsolo, tornando o ambiente condutivo (SAUCK, 2000). Baixos valores de cargabilidade são apresentados por vazamentos recentes, enquanto vazamentos antigos apresentam altos valores de cargabilidade (BRAGA, 2005).

O vazamento do Posto Cristal foi considerado antigo (REIS JUNIOR, 2009), logo os alvos deste trabalho são zonas de atenuação de sinal no radargrama, cargabilidade elevada nas pseudo-seções de IP e condutividade elevada nas pseudo-seções de Eletroresistividade. A presença de argila, contudo, possui o mesmo efeito, a mesma assinatura. A área onde se encontra o Posto Cristal é sedimentar e possui argila e areia. Em outras palavras, o alvo deste trabalho confunde-se com a argila presente na área quanto aos efeitos que os mesmos provocam.

Reis Junior (op.cit.) confeccionou mapas de atenuações do sinal do radar dentro do Posto Cristal nas zonas sem a presença de argilas, de acordo com os perfis geológicos construídos com os dados de furos de sondagem da ENSR (2007). É certo, portanto, que o volume do vazamento é superior aquele observado nos mapas de atenuação, porque também zonas ricas em argila foram atingidas.

Os resultados desse trabalho mostram zonas extensas atenuadas, mas a área não conta com furos para calibrar as respostas obtidas. Consequentemente, nenhuma indicação pôde ser comprovada.

Por outro lado, é possível, no caso de múltiplos vazamentos, o mais provável para o Posto Cristal, que os vazamentos recentes apresentem nenhuma atenuação no radargrama, cargabilidade baixa e resistividade elevada. A biodegradação pode, também, ser retardada pelo confinamento de aquíferos por lentes de argila ou pelas próprias reações biogeoquímicas (VEGA et al., 2009) e, além disso, o alto teor de álcool adicionado à gasolina pode também retardar a biodegradação, além de aumentar a solubilidade e mobilidade dos compostos BTEX dissolvidos na água subterrânea. O maior feito de Reis Ju-

nior. (2009), no entanto, é mostrar mapas coerentes com a presença de hidrocarbonetos na fase residual e mesmo livres construídos a partir da hipótese de vazamentos comportando-se como antigos.

Neste trabalho, externo ao Posto, o grau de dificuldade é extremo. As áreas indicadas na interpretação geofísica como possuidoras da assinatura procurada indicativa da presença de hidrocarbonetos na fase dissolvida, residual e talvez até livre, carecem de sentido sem o apoio do resultado de furos de sondagem, como é de praxe. No entanto, servem para indicar onde esses furos devem ser preferencialmente realizados para testar as hipóteses levantadas na interpretação. O mérito deste trabalho, portanto, é poder servir de guia para furos que venham por ventura a serem realizados.

A despeito do que foi levantado, merece destaque especial o perfil 5, cujos resultados apresentam fortes contrastes e a assinatura sugere resultar do soerguimento e rebaixamento do lençol freático com as estações do ano deixando para trás de si a contaminação na sua fase residual.

Devido à pequena distância do perfil 5 ao tanque 1 e ao fato que análise mostrou a contaminação da água do poço da residência onde se encontra o perfil 5, bem como a distancia do tanque às outras residências cuja água do poço também se mostrou contaminada, a velocidade de fluxo medido pela empresa ENSR de aproximadamente 0,435 m/ano (ENSR, 2007) é incorreta, pois com esse valor a contaminação não chegaria àquelas localidades.

Consequentemente, também a classificação do vazamento do Posto Cristal na classe 3 da ASTM E1739-95 (vide Tabela 4) pela ENSR (op.cit.) é inadequada. É conveniente observar que acompanha a classificação a seguinte observação: “Água subterrânea está impactada e existe um poço de abastecimento doméstico, produzindo a partir do aquífero impactado, situado a uma distância maior de 2 anos, considerando a velocidade de deslocamento da água subterrânea” (ENSR op.cit.).

As informações reunidas neste trabalho permitem classificar o vazamento do Posto seguindo a ASTM E1739-95 (vide Tabela 4) na **classe 2** – “Dano em curto prazo (0 a 2 anos) para a saúde ou segurança humana ou de outros receptores sensíveis” – ou mesmo na **classe 1** – “Dano imediato à saúde ou segurança humana ou de outros receptores sensíveis”.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. A. **Estudo da contaminação por hidrocarbonetos em postos de serviços de Abaetetuba - Pa utilizando Georadar**. 2007. 143f. - Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- ANNAN, A. P. GPR – History, trends, and future developments. **Subsurface Sensing Technologies and Applications**, v. 3, n. 4, p. 253 – 270. 2002.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Composição química da gasolina**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.com.br>>. Acesso em 9 de julho de 2009.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E1739 – 95. **Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites**. 2002. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/E1739.htm>> Acesso em 27/09/2009.
- BORGES, W. R. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade**. 2002. 153 f. Dissertação (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) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP, 2007.
- BRAGA, A.C.O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica - Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP**. 1997. 169 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista-UNESP, IGCE, Pós-Graduação em Geociências, Área de Concentração Geociências e Meio Ambiente, Campus de Rio Claro - SP, 1997.
- BRAGA, A.C.O.; CARDINALI, M. T. Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v.23, p 181-190. 2005.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria 518/2004**. Publicada em 25 de março de 2004. Disponível em: <http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria_518_2004.pdf>. Acesso em: 26/09/2010.
- BRATBERG, D.; HOPKINS, L. Risk based corrective action and risk assessment procedures in the United States: a 1995 Survey. In: PETROLEUM HYDROCARBON AND ORGANIC CHEMICALS IN GROUND WATER: prevention, detection, and restoration conference. **Proceedings**. Houston, Texas. 1995. p. 25-31.

CARDINALI, M.T. **Aplicação dos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida em estudos laboratoriais de contaminação de solo e água subterrânea por gasolina.** 2007. 140 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Paulista, SP, 2007.

CORSEUIL, H, X. ; MARINS, M, D, M. Contaminação de águas subterrâneas por derramamentos de gasolina. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.2, n.2, p.50-54. 1997.

CORSEUIL, H, X.; MARINS, M, D, M. Efeitos causados pela mistura de gasolina e álcool em contaminações de águas subterrâneas **Boletim Técnico da Petrobrás**, Rio de Janeiro p. 133-138. 1998.

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 em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2009. ENRS. Environmental Services. Investigação Ambiental Detalhada e Análise de Risco Tier 1. Belém, 2007.

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.

ENVIROMENTAL Services (ENRS). **Investigação ambiental detalhada e análise de risco** Tier 1. Belém, 2007.

FACHIN, S. J. S. **Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação de parâmetro de aquisição e monitoramento ambiental do problema.** 2007. 136 f. Dissertação (mestrado) - Instituto de Astronomia, Geociências e Ciências Atmosféricas – IAG, Departamento de Geofísica – Universidade de São Paulo – USP, 2007.

FERREIRA, J. ;ZUQUETTE, L.V. Considerações sobre as interações entre contaminantes constituídos de hidrocarbonetos e os componentes do meio físico. **Geociências**, São Paulo, v. 17, n.2, p. 527 – 557. 1998.

FETTER, C. W. **Contaminant hydrogeology.** New York: Macmillan, 1993.

GALLAS, J. D. F. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental.** 2000. 174f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP) – IGCE, Pós-Graduação em Geociências, Área de Concentração Geociências e Meio Ambiente, Campus de Rio Claro - SP, 2000.

GEOTOMO SOFTWARE. **Geoelectrical imaging 2D & 3D.** Disponível em: <www.geoelectrical.com>. Acesso em: 20 jul. 2009.

MANCINI, T. M. **Métodos de caracterização de áreas potencialmente contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo.** 2002. 146f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, São Paulo, 2002.

MARTINHO, E.; ALMEIDA, F.; SENOS MATIAS, M.J. An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements. **Journal of Applied Geophysics**, n. 60, p. 27 – 40. 2006.

MATTA, M. A. S. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região metropolitana de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil**. 2002. 292 f. Tese (doutorado em geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica por campos variables**. Madrid: Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 1974. 571 p.

PARASNIS, D.S. **Geofísica minera**. Madri: Ed. Paraninfo, 1971. 376p.

PORSANI, J.L. **Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP**. 1999. 145f . Tese (doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 1999.

REIS JR, J. A. **Estudo de pluma de contaminação por combustível com o método GPR e desenvolvimento de simulador geofísico para fins educativos (Belém - Pa)**. 2009. 153 f. Dissertação (mestrado em geofísica) Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2009.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. New York: John Wiley & Sons Ltda., 1997. 796p.

SANDMEIER, K. **REFLEXW**. Disponível em: <www.sandmeier-geo.de/Reflex/gpr.htm>. Acesso em: 27 Set. 2009.

SAUCK, W. A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. **Journal of Applied Geophysics**, v. 44, n.1-2, p. 151-165. 2000.

STRATTON, J.A. **Electromagnetic theory**. New York: McGraw-Hill, 1941. 615 p.

TELFORD, W. M. ;GELDART, L. P. ; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**. Second Edition. New York: Cambridge University press, 1990. 770 p.

TIBURTIUS, E.R.L.; ZAMORA, P.P.; LEAL, E.S. Contaminação de águas por BTEX e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. **Quim. Nova**, v 27, n 3, p 441-446. 2004.

VEGA, M.; OSELLA, A.A.; LASCANO, E. - Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v.54, n.1, p.97-109. 2003.

WARD, S. H. Resistivity and Induced polarization methods, In: WARD, S.H. (Ed.). **Geotechnical and environmental geophysics**. 2^a 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).