

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**

**Localização e Delineamento de Pluma de  
Contaminação por Hidrocarbonetos através dos  
Métodos GPR e Tomografia Elétrica**

RODRIGO ALVES ORTEGA

São Paulo  
2006

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RODRIGO A. ORTEGA

Localização e Delineamento de Pluma de Contaminação por  
Hidrocarbonetos através dos Métodos GPR e Tomografia Elétrica

Dissertação apresentada ao Instituto de  
Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
da Universidade de São Paulo para obtenção do  
título de Mestre em Ciências. Área de  
concentração: Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Porsani

São Paulo  
2006

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do IAG/USP, pela oportunidade, estrutura e convívio durante esse período de aprendizagem.

Ao Professor Dr. Jorge Luís Porsani, pela orientação, incentivo, sugestões e críticas oferecidas no decorrer dessa experiência acadêmica.

A IDS RADAR por ter cedido os dados apresentados neste relatório e dado a oportunidade da realização deste e as disciplinas necessárias durante os períodos de aula.

A GEORADAR por me apoiar a dar continuidade e finalizar este trabalho.

A meus Pais, Irmãos, e amigos por sempre me apoiarem no desenrolar deste trabalho.

**A minha esposa Taciana Ortega, pelo companheirismo, carinho, paciência e estímulo à conclusão deste trabalho.**

Comece fazendo o que é necessário,  
Depois o que é possível,  
e de repente você estará fazendo o impossível.

**São Francisco de Assis**

## RESUMO

ORTEGA, R. A., 2006. **Localização e Delineamento de Pluma de Contaminação por Hidrocarbonetos através dos Métodos GPR e Tomografia Elétrica. Dissertação de Mestrado, IAG-USP, São Paulo.**

Perfis geofísicos de GPR - *Ground Penetrating Radar* e Tomografia Elétrica (Eletrorresistividade), bem como coleta de amostras de concentração de Compostos Orgânicos Voláteis - “VOC” foram realizados num centro de abastecimento de locomotivas na região de Paulínia-SP, visando a localização e o delineamento de uma possível pluma de contaminação provocada por derivados de hidrocarboneto (óleo diesel). Foram estudadas duas áreas: “área A” – tanque de armazenamento de combustíveis e “área B” – posto de abastecimento de locomotivas, sendo que estas áreas serão mantidas em sigilo, pois os resultados desta pesquisa referem-se a um projeto comercial. Os resultados geofísicos mostraram regiões anômalas de elevada condutividade elétrica nas seções de caminhamentos elétricos relacionadas com uma zona de sombras, i.e., *shadow zone* nos perfis GPR que são caracterizadas por uma ausência de reflexão do sinal eletromagnético. Na área “A”, as anomalias geofísicas de GPR e eletrorresistividade provavelmente estão relacionadas com as características da geologia local, bem como ao solo saturado, uma vez que os valores das concentrações de VOC são extremamente baixos, indicando ausência de contaminação. Por outro lado, na área “B” as anomalias geofísicas coincidiram com os pontos de amostragem onde os valores de concentração de VOC foram bastante elevados, indicando que esta é uma área com elevado potencial de contaminação por óleo diesel. A integração dos resultados das sondagens de VOC com os resultados dos levantamentos

geofísicos (GPR e Eletrorresistividade) foi fundamental para uma melhor caracterização e delineamento da pluma de contaminação nas áreas de estudo, mostrando assim a eficácia dos métodos geofísicos em estudos ambientais.

**Palavras-chave:** GPR, *Ground Penetrating Radar*, Eletrorresistividade, Tomografia elétrica, VOC, Compostos Orgânicos Voláteis, Contaminação ambiental, Derivados de hidrocarbonetos, óleo diesel.

## ABSTRACT

ORTEGA, R. A., 2006. **Location and Delineation of Contamination plume of Hydrocarbon using GPR and Electric Tomography methods. Master Science, IAG-USP, São Paulo.**

Geophysical profiles of GPR (Ground Penetrating Radar) and Electric Tomography (Electric resistivity), as well as Volatile Organic Compounds “VOC” sampling, had been made in a locomotives fuel supply center located in Paulínia/SP, aiming a localization and delineation for a possible hydrocarbon (diesel oil) contamination plume. Two areas had been studied: “Area A” – fuel tank storage and “Area B” – locomotives fuel supply center. These areas will remain in secrecy because the research is mentioned to a commercial project. The geophysical data related to a shadow zone showed some anomalous high electrical conductivity regions, characterized by absence of electromagnetic wave reflections. In the “Area A”, the GPR and Electric resistivity anomalies probably related to the geological background as well as saturated soils, once the VOC concentrations are extremely low (no contamination, therefore). On the other hand, the “Area B” showed geophysical anomalies coincident to the high VOC sampling sites (then, potentially oil contaminated areas). In this site, the correlation between the VOC sampling and geophysical data had been essential for the localization and delineation of the hydrocarbon contamination plume, demonstrating the geophysical researches efficiency in environment studies.



**Key-words:** GPR, Ground Penetrating Radar, Electrorresistivity, Electric tomography, VOC, Volatile Organics Compounds, Contamination, Hydrocarbon.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo .....	21
Figura 2.2: Mapa Esquemático da área de estudo .....	24
Figura 2.3: Localização geográfica da Bacia do Paraná no contexto da América no Sul.....	26
Figura 2.4: Diagramas crono-estratigráficos da Bacia do Paraná .....	28
Figura 2.5: Mapa geológico local, evidenciando as Formações rochosas aflorantes na área de estudo .....	29
Figura 3.1. Princípio de funcionamento do GPR. ....	37
Figura 3.2: Disposição dos eletrodos no arranjo Dipolo-Dipolo.....	52
Figura 3.3: Distribuição dos pontos medidos em profundidade do arranjo Dipolo - Dipolo.....	52
Figura 4.1: Arranjos das antenas contidos no GPR multifrequencial.....	56
Figura 4.2: Mapa de linhas de aquisição geofísica para a área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.....	59
Figura 4.3: Malha dos furos da Coleta de VOC da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.....	61
Figura 4.4: Mapa de linhas de aquisição geofísica para a área “B” - Posto de Abastecimento de Locomotivas.....	63
Figura 4.5: Malha dos furos da Coleta de VOC da área “B” - Posto de Abastecimento de Locomotivas.....	65
Figura 5.1: Mapa de Atenuação do sinal da área “A” – Tanque de Armazenamento de Combustíveis.....	73

Figura 5.2: Seção GPR - 1 da área “A” – Tanque de Armazenamento de Combustíveis. ....	74
Figura 5.3: Seções GPR – 2, 3 e 4 da área “A” – Tanque de Armazenamento de Combustíveis. ....	75
Figura 5.4: Caminhamento Elétrico – 01 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.....	80
Figura 5.5: Caminhamento Elétrico – 02 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.....	81
Figura 5.6: Caminhamento Elétrico – 03 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.....	82
Figura 5.7: Caminhamento Elétrico – 04 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.....	83
Figura 5.8: Caminhamento Elétrico – 05 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.....	84
Figura 5.9: Mapa de anomalias da “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.....	85
Figura 5.10: Mapa de VOC da área “A” – Tanque de Armazenamento de Combustíveis, para a profundidade de 0,5m.....	86
Figura 5.11: Mapa de VOC da área “A” – Tanque de Armazenamento de Combustíveis, para a profundidade de 1,0m. ....	87
Figura 5.12: Mapa de Atenuação do sinal da área “B” – Posto de Abastecimento de Locomotivas.....	95
Figura 5.13: Seção GPR – 1 para as freqüências de 600MHz, 200MHz e 100MHz da área “B” Posto de Abastecimento de Locomotivas.....	96

Figura 5.14: Seção GPR – 2 e 3 para as freqüências de 100MHz da área “B” Posto de Abastecimento de Locomotivas .....	97
Figura 5.15: Caminhamento Elétrico 06 da área “B” Posto de Abastecimento de Locomotivas.....	98
Figura 5.16: Caminhamento Elétrico 07 da área “B” Posto de Abastecimento de Locomotivas.....	99
Figura 5.17: Caminhamento Elétrico 08 da área “B” Posto de Abastecimento de Locomotivas.....	100
Figura 5.18: Mapa de anomalias da área “B” Posto de Abastecimento de Locomotivas.....	101
Figura 5.19: Mapa de VOC da área “B” para 0,5m de profundidade .....	102
Figura 5.20: Mapa de VOC da área “B” para 1,0m de profundidade .....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Freqüência central das antenas x Profundidade máxima de penetração .	44
Tabela 4.1: Valores de resistividades de alguns tipos Litológicos .....	48
Tabela 5.1: Ponto Amostrado, horário, temperatura, umidade e variações nos valores de concentração de vapores orgânicos (VOC’s) .....	89
Tabela 5.2: Pontos de Amostragem, horário, temperatura, umidade e variações nos valores de concentração de vapores orgânicos (VOC’s) .....	94

## LISTA DE FOTOS

Foto 2.1: Foto da área “A” - Tanques de armazenamento de combustíveis.....	22
Foto 2.2: Foto da área “B” - Posto de abastecimento de locomotivas .....	22
Foto 2.3: Foto da área “B” - Posto de abastecimento de locomotivas .....	23
Foto 2.4: Geologia da área “B” - Posto de abastecimento de locomotivas .....	31
Foto 3.1: Monitor de Vapores – <i>GASTECH INNOVA-SV</i> .....	54

# SUMÁRIO

<b>1. - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>2. - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E GEOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
2.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....	19
2.2 - ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	25
<b>3. - METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1. - MÉTODO GPR .....</b>	<b>32</b>
3.1.1 - HISTÓRICO DO GPR .....	32
3.1.2 - PRINCÍPIOS DO GPR.....	36
3.1.3 - PROPAGAÇÃO DA ONDA ELETROMAGNÉTICA .....	38
3.1.4 - COEFICIENTE DE REFLEXÃO .....	43
3.1.5 - PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO .....	44
3.1.6 - TECNICAS DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO MEIO .....	45
<b>3.2 - MÉTODO DA ELETORRESISTIVIDADE .....</b>	<b>46</b>
3.2.1 - HISTÓRICO DA ELETORRESISTIVIDADE.....	46
3.2.2 - PRINCÍPIOS TEORICOS .....	47
3.2.3 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA .....	48
3.2.4 - TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO .....	50
<b>3.3 - COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS (VOC) .....</b>	<b>53</b>
<b>4. - AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS.....</b>	<b>55</b>
4.1 - AQUISIÇÃO DOS DADOS .....	55
4.1.1 - ÁREA “A” - TANQUES DE ARMAZENAMENTO DE COMBUSTÍVEIS.....	57

4.1.1.1 - GPR ( <i>Ground Penetrating Radar</i> ) .....	57
4.1.1.2 - ELETORRESISTIVIDADE .....	60
4.1.1.3 - COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS (VOC).....	60
4.1.2 - ÁREA “B” – POSTO DE ABASTECIMENTO DE LOCOMOTIVAS.....	62
4.1.2.1 - GPR ( <i>Ground Penetrating Radar</i> ) .....	62
4.1.2.2 - ELETORRESISTIVIDADE .....	64
4.1.2.3 - COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS (VOC).....	64
4.2. - TRATAMENTO DOS DADOS .....	66
4.2.1.- GPR ( <i>Ground Penetrating Radar</i> ) .....	66
4.2.2 - ELETORRESISTIVIDADE .....	68
4.2.3 - COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS (VOC).....	69
<b>5. - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>71</b>
5.1 - ÁREA “A” - TANQUES DE ARMAZENAMENTO DE COMBUSTÍVEIS.....	72
5.2 - ÁREA “B” – POSTO DE ABASTECIMENTO DE LOCOMOTIVAS.....	90
<b>6. - CONCLUSÃO .....</b>	<b>104</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>106</b>

# 1. Introdução e Objetivos

Uma das principais preocupações de todos os povos que habitam o nosso planeta refere-se aos problemas de contaminação do meio ambiente. Existem vários tipos de substâncias sólidas ou líquidas que podem contaminar o nosso subsolo e os recursos hídricos, e assim colocar a vida das pessoas em risco.

Dentre as diversas fontes ou atividades potencialmente geradoras de contaminação do subterrâneo (solo e sistemas hídricos), destacam-se as de cunho localizado, como áreas industriais, através de derrames propositais ou acidentais; pátios de abastecimento e postos de serviços, onde a contaminação pode ocorrer tanto por derrames superficiais próximos às bombas de abastecimento ou por falha de equipamento ou por mau manuseio do operador, como também pela ocorrência de vazamentos nos tanques de armazenamento de combustíveis (mais conhecidos por SASC “**S**istema de **A**rmazenamento **S**ubterrâneo de **C**ombustível”), devido sua má construção e selamento ou corrosão. Contaminações esparsas de maior porte podem também ocorrer em locais com grande concentrações de indústrias, refinarias, portos e aeroportos.

No Brasil existe um grande número de áreas poluídas e contaminadas deixando heranças na forma de passivos ambientais provenientes da disposição inadequada de resíduos sólidos e líquidos (efluentes) urbanos, industriais e agrícolas ou estéreis e rejeitos provenientes da mineração, bem como, por derrames e vazamentos de combustíveis orgânicos (derivados de petróleo).



Os contaminantes por meio de sua mobilização alcançam as águas subterrâneas, comprometendo, muitas vezes importantes reservas de água doce em nosso planeta.

Com o crescimento da consciência da população e dos órgãos governamentais quanto à qualidade e manutenção do meio ambiente, aumentaram os investimentos aplicados à pesquisa de novas tecnologias na detecção, monitoramento e recuperação de áreas já degradadas. Neste sentido, a geofísica ambiental é uma das áreas da ciência que está em franca ascensão e corresponde à aplicação de métodos geofísicos para a investigação de fenômenos físico-químicos em subsuperfície que apresentam implicações para o meio ambiente.

Segundo Krugüer (2002) a finalidade da Geofísica Ambiental é prover uma ampla visão de subsuperfície complementando informações provenientes de sondagens, de maneira não invasiva, tendo grande importância em situações de resíduos perigosos, ou minimizando criar um caminho preferencial para os contaminantes quando uma perfuração em locais de lentes ou aquíferos contaminados ou não contaminados sobrepostos.

Nos últimos anos a Geofísica Ambiental ganhou grande espaço como ferramenta em diagnósticos ambientais, na identificação da presença da contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

A investigação de solos e águas subterrâneas contaminadas por compostos orgânicos (por exemplo os derivados de hidrocarbonetos) tem sido

feita através de técnicas diretas, tais como furo de sondagens, poços de monitoramentos, e recentemente através da aplicação de métodos geofísicos, os seja, através de técnicas indiretas.

Os métodos Geofísicos são métodos indiretos e não invasivos com capacidade de levantar grandes áreas em curtos períodos de tempo, fornecendo como resultados perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea.

A interpretação dos dados geofísicos pode contribuir para a obtenção de informações sobre a litologia, estratigrafia, profundidade do nível d'água, profundidade do embasamento, presença de falhas ou fraturas, existência de aquíferos importantes, caminhos preferenciais de propagação subterrânea e outras feições geológicas de interesse.

Na avaliação da presença da contaminação em profundidade, o emprego dos métodos geofísicos está voltado, especificamente, à localização de valas contendo resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de tambores e tanques enterrados e determinação de vazamentos em tanques ou dutos (CETESB - GTZ,1999).

Com esta crescente demanda de trabalhos relacionados aos estudos ambientais e o alto custo dispendido na recuperação de áreas contaminadas, aumentou sobremaneira, o interesse do mercado pelas investigações não invasivas, tais como, os métodos geofísicos, devidos aos baixos custos e a rapidez de execução dos seus levantamentos, quando comparado com os custos

envolvidos nas etapas de recuperação de áreas contaminadas (REYNOLDS, 1997).

Seguindo esta tendência, tornam-se cada vez mais comuns à utilização dos Métodos Geofísicos eletromagnéticos, por exemplo, radar de penetração no solo GPR (*Ground Penetrating Radar*) e o método geométrico denominado de eletrorresistividade, ambos aplicados aos estudos ambientais, devidos à sua eficácia quanto às assinaturas provenientes de plumas de contaminação, conforme pode ser constatado na literatura (SAUCK et al., 1998a, 1998b; SAUCK, 1999; WERKEMA et al., 2000; KRÜGER, 2002; CASTRO & CASTELO BRANCO, 2003; PORSANI et al., 2004, dentre outros).

Neste sentido, o objetivo proposto nesta dissertação consiste em localizar e delinear as plumas de contaminação provenientes de produtos derivados de petróleo (hidrocarbonetos) através do emprego dos métodos geofísicos de GPR (*Ground Penetrating Radar*) e Eletrorresistividade em duas áreas distintas dentro de uma área reservada para o abastecimento de locomotivas localizadas na cidade de Paulínia, Estado de São Paulo. Por se tratar de dados sigilosos decorrentes de um projeto comercial a localização detalhada da área de estudos não poderá ser apresentada. Então, as áreas de estudos são denominadas nesta pesquisa como sendo áreas “A” e “B”, e serão mantidas em sigilo por questões de segurança da própria empresa privada IDS-Radar que nos permitiu a publicação dos resultados mediante a condição de não tornar público o local de origem dos dados. Para uma confirmação dos resultados geofísicos foram realizados furos de

sondagens e coletados gases para análises de Gases denominados de VOC (Compostos Orgânicos Voláteis) nas áreas citadas.

## **2. Localização da área de estudo e Geologia**

### **2.1 Localização da área**

A área de estudo com 3.063 m<sup>2</sup> corresponde à um local de abastecimento de combustível localizada na cidade de Paulínia, Estado de São Paulo (Figura 2.1). Na área de estudo estão dispostos quatro tanques, quatro bandejas e quatro bombas. Para facilitar a discussão e comparação dos resultados, a área de estudo foi dividida em duas partes denominadas de áreas “A” e “B” sendo representadas como área de tanques de armazenamento de combustíveis e área de posto de abastecimento de locomotivas, respectivamente. As fotografias 2.1, 2.2 e 2.3 mostram as áreas da pesquisa.

Um levantamento de reconhecimento visual, realizado num raio de 1000 metros do local onde foi realizada a pesquisa, indica uma vizinhança com baixa taxa de ocupação do solo; nenhuma ocorrência de imóveis residenciais e comerciais, nem de edifícios em construção, de hospitais, de escolas, estações agrícolas, e nenhuma galeria de águas pluviais e outras utilidades subterrâneas presentes neste local.

Na área de estudo, não existe nenhuma perspectiva de desativação do local de abastecimento, assim como não há registro da utilização da área por outras atividades antes de sua construção, há mais de 20 anos. Conforme

levantamento efetuado no DAEE, não há cadastro de poços tubulares para abastecimento público na área em questão.

Na área “A” encontram-se dois tanques dispostos sobre a superfície, dois subterrâneos e duas bombas na superfície (Foto 2.1), e na área “B” há duas bombas e quatro bandejas de armazenamento de combustível (Foto 2.2). O local encontra-se a uma altura do nível do mar de aproximadamente 598 metros (Governo do Estado de São Paulo / Secretaria de Economia e Planejamento, 1979).

A área “A” encontra-se a montante da área “B” sendo que o sentido do fluxo d’ água subterrânea segue da área “A” em direção a área B (Figura 2.2).



Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo



Foto 2.1: Foto da área “A” - Tanques de armazenamento de combustíveis.

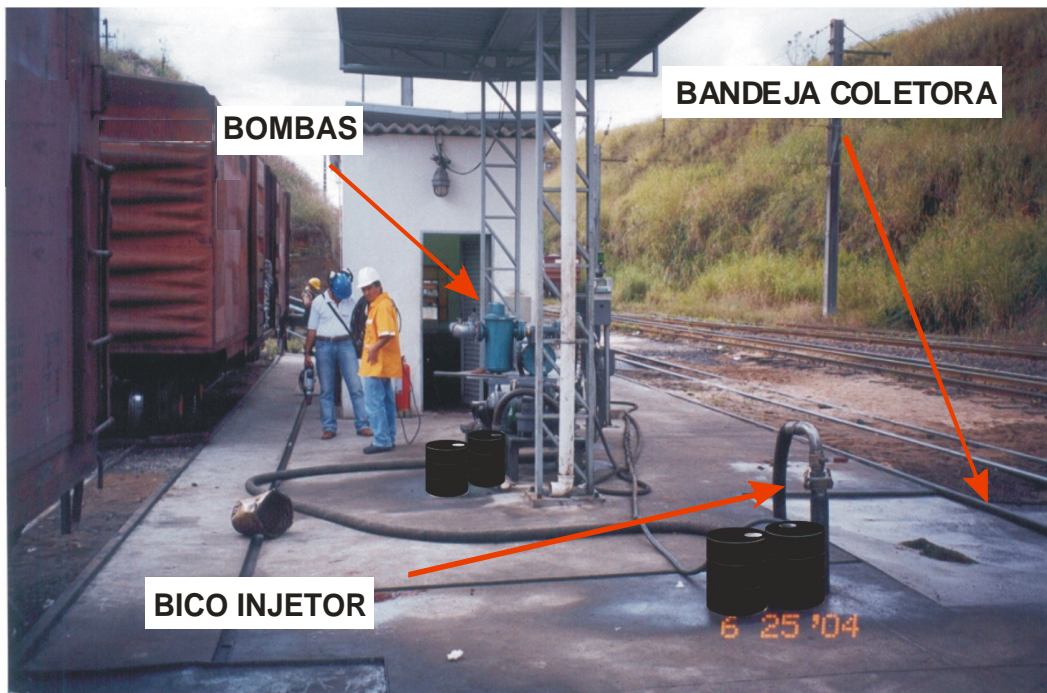


Foto 2.2: Foto da área “B” - Posto de abastecimento de locomotivas.

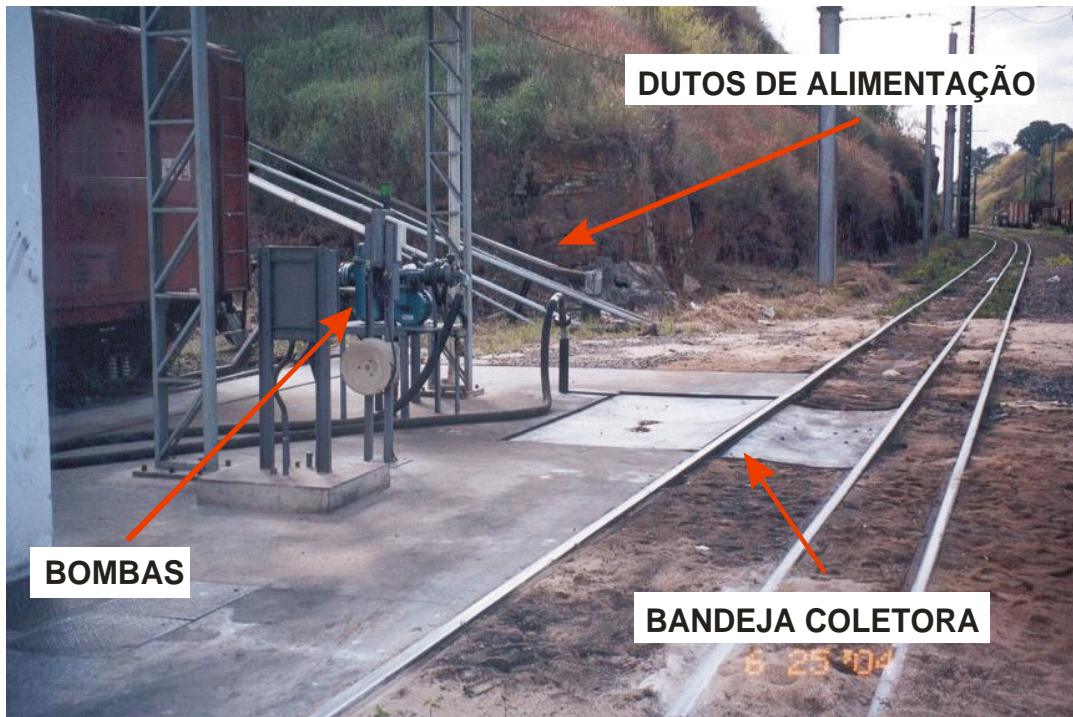


Foto 2.3: Foto da área “B” - Posto de abastecimento de locomotivas.



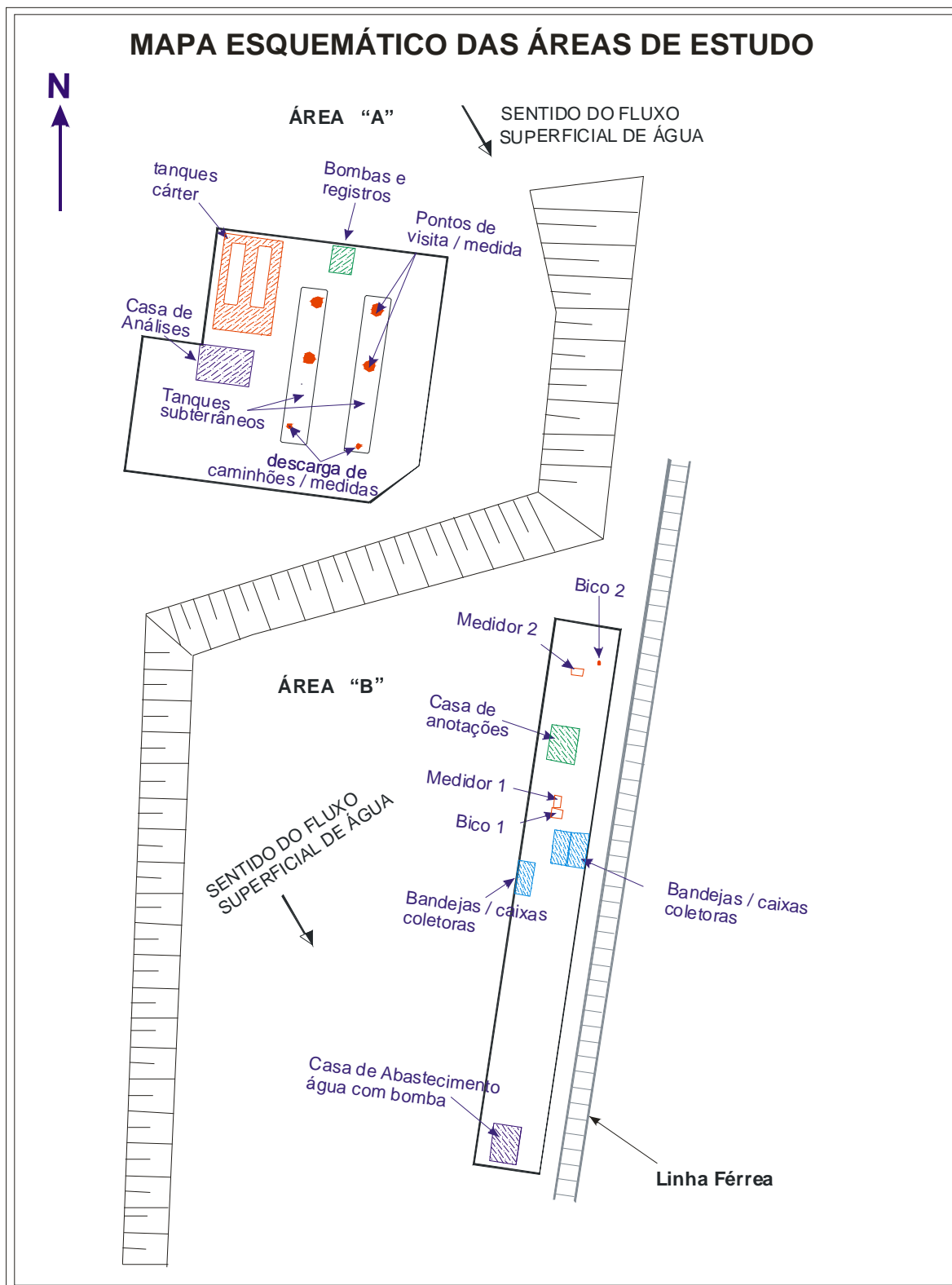


Figura 2.2: Mapa Esquemático da área de estudo

## **2.2 Aspectos Geológicos**

A presente área de estudo insere-se no contexto geotectônico denominado Bacia do Paraná; região que engloba o Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai concomitantemente e localiza-se na porção centro-leste da América do Sul, abrangendo uma extensão territorial de aproximadamente 1.600.000 km<sup>2</sup> (MILANI, 2004).

A Bacia do Paraná constitui uma imensa região sedimentar da América do Sul, abrigando dentro de seus limites uma sucessão sedimentar-magmática com idades entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo. No Brasil, a Bacia do Paraná ocupa a maior parte dos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina (região central e ocidental) e Rio Grande do Sul (regiões norte, central e ocidental), além de partes das regiões sudoeste de Minas Gerais, sul de Goiás, sudeste do Mato Grosso do Sul e extremo sul do Mato Grosso. No total, a área ocupada em território brasileiro atinge 1.300.000 km<sup>2</sup> (Figura 2.3).



Figura 2.3: Localização geográfica da Bacia do Paraná no contexto da América no Sul (Milani, 2004).

Segundo Machado (2005), em termos estratigráficos a Bacia do Paraná pode ser dividida em seis seqüências de sedimentação, que se estendem do Ordoviciano-Siluriano ao Neocretáceo, separadas entre si por três discontinuidades, conforme pode ser observado nos diagramas cronoestratigráficos mostrados na Figura 2.4. Estas discontinuidades representam a superposição de, no mínimo, três bacias diferentes, cujas geometrias e limites variam de uma para outra, em decorrência do movimento das placas, que conduziu a evolução do Gondwana no tempo geológico. No presente trabalho apresenta-se uma breve característica litológica das formações rochosas que afloram nas proximidades da área de estudo conforme o mapa da Figura 2.5.

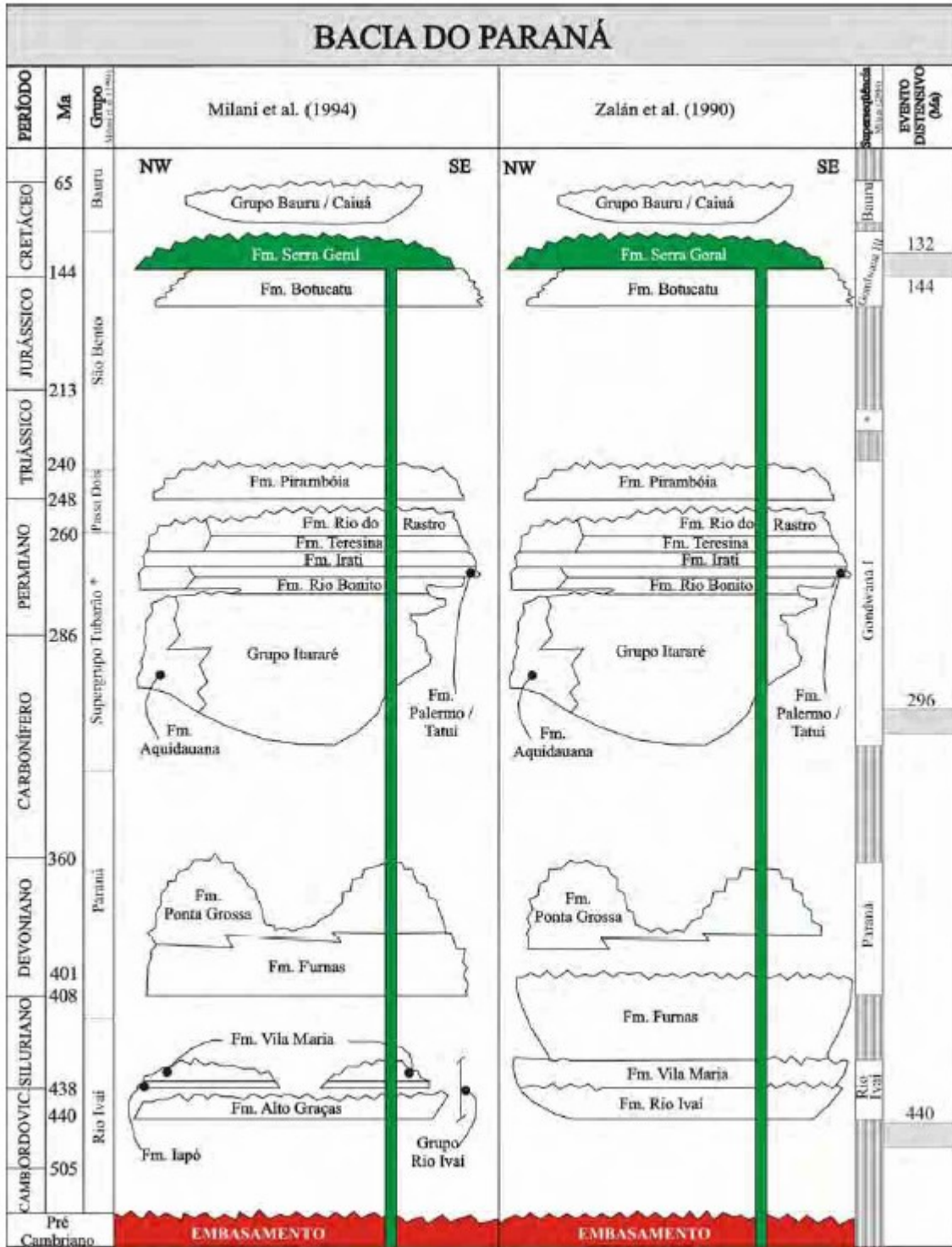


Figura 2.4 - Diagramas crono-estratigráficos da Bacia do Paraná (Machado, 2005).

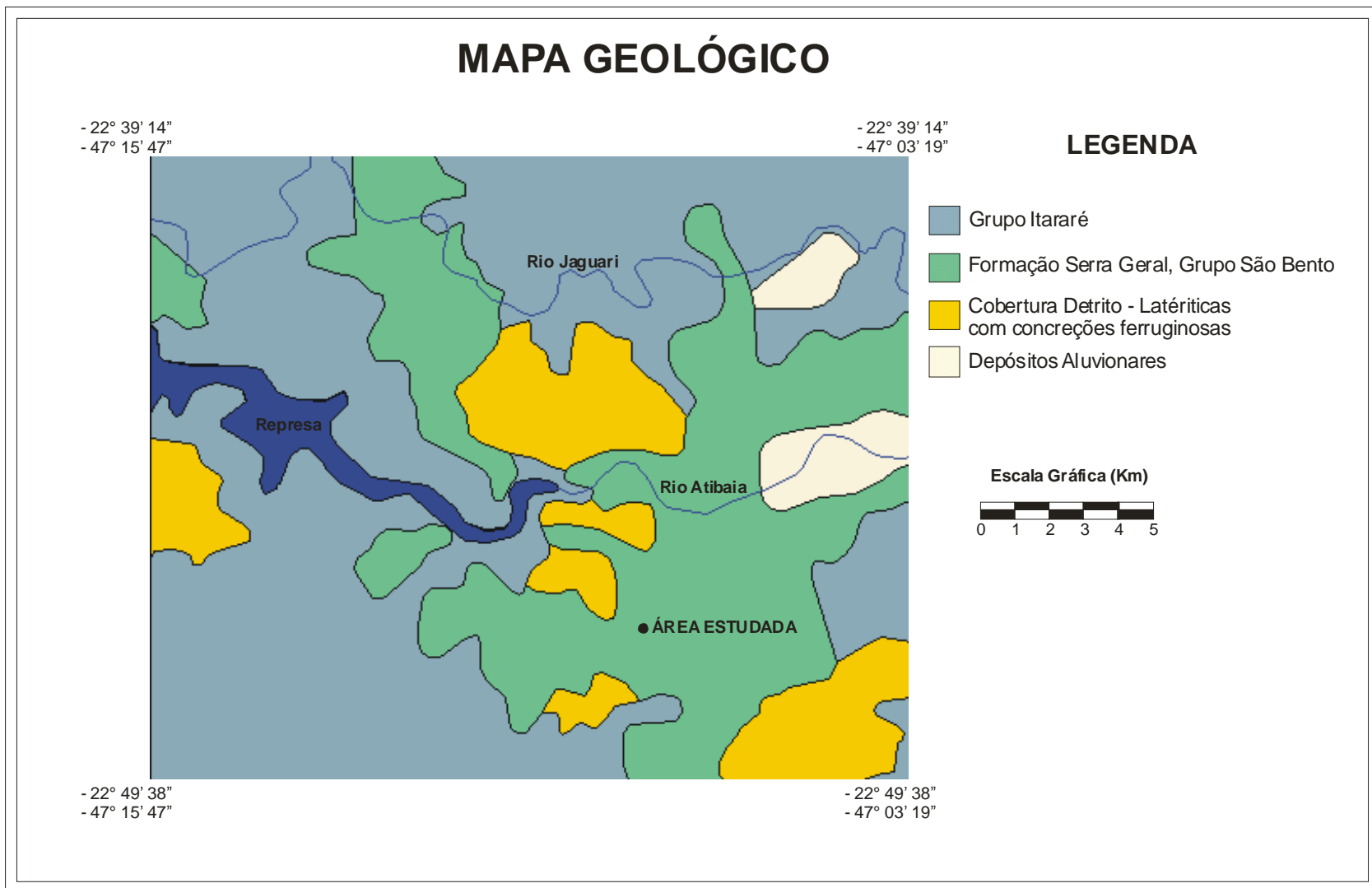


Figura 2.5: Mapa geológico local, evidenciando as Formações rochosas aflorantes na área de estudo (modificada de CPRM, 2004)

A área de estudos é caracterizada principalmente por uma zona de alteração de um pacote de lavas pertencentes à Formação Serra Geral, Grupo São Bento, que depositaram-se sobre os arenitos da Formação Botucatu, cujo contato é discordante e abrupto, podendo sua origem estar relacionada a uma pausa no evento vulcânico, ou até mesmo na penetração do magma, na forma de *sills* ou soleiras (Foto 2.4). Normalmente, as soleiras ocorrem encaixadas nos sedimentos paleozóicos da Bacia do Paraná, sendo relativamente comum em toda sua extensão, tendo como área aflorante principalmente a parte leste do limite da bacia.

Na área de estudo verificamos a presença de soleiras de Diabásio alteradas sobrepostas aos arenitos da formação Botucatu (Foto 2.4) e solos formados pela alteração do mesmo. A área “A” - Tanques de Armazenamento de Combustíveis localiza-se a montante da Soleira de Diabásio apresentada na Foto 2.4 (área de onde provem os dutos visualizados na mesma) e a área “B” – Posto de abastecimento de Locomotivas é de onde foi tirada a foto em questão.



Foto 2.4: Geologia da área “B” - Posto de abastecimento de locomotivas



## **3. Metodologia**

### **3.1 Método GPR**

#### **3.1.1 Histórico do GPR**

O primeiro uso de sinais eletromagnéticos para determinar a presença remota de materiais enterrados é atribuída a HULSMAYER em 1904, mas a primeira descrição de seu uso para a localização de objetos enterrados surgiu seis anos depois numa patente alemã de Leimbach & Löwy (DANIELS, 1996).

Os primeiros trabalhos realizados com o método do GPR no mundo foram em sua maioria para determinar a espessura e rupturas em geleiras tendo como autores Stern, 1929, Olhoeft, 1996, Daniels, 1996.

Na década de 70, o uso do GPR em ambientes sem gelo tornou-se mais intenso, onde um renovado interesse pelo tema surgiu associado à missão da Apollo 17 na Lua (ULRIKSEN, 1982).

Os levantamentos com GPR na Lua, permitiram obter informações de estruturas geológicas da superfície lunar em até cerca de 1,5km de profundidade (DANIELS, op. cit.).

Em 1972 é criada a *Geophysical Survey System Inc.* (GSSI) por Rex Morey e Art Drake, que iniciou a venda do sistema comercial do GPR (MOREY, 1974).

Nos anos 80 o GPR começou a ser utilizado como um método de exploração geofísica, isto se deve ao fato do avanço tecnológico ocorrido nesta década que, com isso, fez com que vários tipos de GPR fossem fabricados e

conseqüentemente, que aumentassem os números de publicações sobre a utilização até hoje.

Nos últimos anos um grande número de trabalhos com o GPR ganharam destaque na área de Meio Ambiente. Dentre eles podemos citar Brewster e Annan (1994) que utilizaram o método do GPR para demonstrar que a presença de contaminantes do tipo DNAPLs (Dense non aqueous phase liquids) causam acréscimo de velocidade na onda eletromagnética em até 30%.

Sauck (1998) elaborou um modelo temporal de biodegradação de LNAPL através de dados de resistividade medidos continuamente em poços. Como os hidrocarbonetos possuem resistividades muito altas e baixas permissividades dielétricas quando encontrados no meio com água, estes devido ao processo natural de biodegradação (o qual acrescenta sólidos dissolvidos na água com o passar do tempo) geram plumas com baixa resistividade, isto é, elevada condutividade elétrica. Verificou também que o sinal do GPR quando sobre uma superfície condutiva devido ao grande estágio de biodegradação do hidrocarboneto, este apresenta anomalias condutivas denominadas de “Shadow Zones” ou zona de sombra. O mesmo verificou que quanto maior o tempo de exposição dos resíduos, menor será a sua resistividade e vice – versa, esta foi sem dúvida uma excelente informação obtida desta pesquisa.

Ainda em 1998 Sauck et al, no estudo da contaminação do solo e água subterrânea por vazamento de óleo cru e gasolina de uma refinaria, verificaram regiões anômalas nas seções geofísicas de GPR caracterizadas por zonas de sombra e nos perfis de Eletrorresistividade e Eletromagnético indutivo observaram

anomalias condutivas. Neste trabalho os autores mostraram estes métodos geofísicos possuem grande aplicabilidade na delimitação de suas plumas contaminantes, e que, a composição e as propriedades físicas do matéria contaminante em fase livre / residual, irão mudar ou evoluir com o tempo.

Krüger (2002) realizou um estudo com o GPR e o método da Eletroresistividade para determinar a pluma de contaminação oriunda de derrames de óleo diesel e de lançamento de efluentes oleosos em uma oficina de manutenção de locomotivas na cidade de Curitiba – PR. Foram realizadas seções de caminhamento elétrico através do arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre os eletrodos de 5 e 10m, o que caracterizou bem as unidades maiores, mas não as menores que interessavam ao estudo, devido os espaçamentos utilizados. Com o levantamento GPR que mapeou até a profundidade de aproximadamente 7m, detalhou-se melhor as camadas mais finas superficiais e com isso identificou-se nitidamente através da ausência de sinais de reflexão nas seções de radar “Radargramas” uma pluma de natureza condutiva que iniciava-se na mancha impactada visível em superfície. Os resultados analíticos de amostras de solo e de água indicaram baixos níveis de contaminação nos pontos anômalos nas seções de GPR mas com grandes concentrações de bactérias o que comprova que os contaminantes foram biodegradados e que ao invés de se ter uma pluma contaminante de natureza elétrica resistiva como era o esperado, foi observado uma pluma de natureza condutiva. Com base nos resultados obtidos, o autor mostrou que os métodos geofísicos são muito úteis para delimitar áreas impactadas e monitorar os processos de biodegradação dos hidrocarbonetos.

Castro & Branco (2002) realizaram um estudo 4D de GPR para avaliar o desenvolvimento de uma pluma de contaminação por hidrocarbonetos ao longo de um período de 15 meses em um posto de gasolina na cidade de Fortaleza - CE. Foram realizadas seções de GPR com diferentes frequências (900, 400, 200 e 80 MHz) para verificar qual apresentava melhor contraste de imagem no detalhamento das “Zonas de Sombra” originadas dentro da zona vadosa e verificou-se que as que apresentaram melhor resposta entre resolução e profundidade de penetração foram às antenas de 200 e 400 MHz. Os autores observaram a diminuição da pluma de contaminação nas seções de radar no período de janeiro de 2001 a março de 2002. Para eles o GPR se mostrou como uma grande ferramenta na delimitação e no estudo da evolução da pluma de contaminação ao longo de um período de tempo.

Pedrosa et al (2005) elaboraram uma pesquisa tentando estabelecer critérios técnico-científicos para a aplicação do método geofísico de GPR – Radar de penetração de Solo em áreas sujeitas à contaminação do substrato rochoso por substâncias orgânicas (hidrocarbonetos) provenientes de vazamentos de tanques de armazenamento de combustíveis em postos de serviços no município de Fortaleza – CE. 20 postos de serviços foram selecionados para o levantamento geofísico sendo que, os critérios de seleção levaram em conta a distribuição espacial destes em relação ao substrato geológico, o ano em que começaram a operar e as facilidades operacionais de realização de seções GPR e coleta de água para a análise hidrogeoquímica. Com as seções geofísicas levantadas foi possível verificar em alguns postos de abastecimento ausência de reflexão no

sinal GPR, denominadas zonas de baixa reflexão que normalmente estão associadas às plumas de contaminação de hidrocarbonetos. Foi possível a partir dos resultados geofísicos que mostrados que o GPR é bastante eficaz, rápido e não evasivo para dimensionar plumas de contaminação por hidrocarbonetos e através das análises hidrogeoquímicas classificar os postos de serviços analisados em 3 categorias: a) *Contaminados*: postos que apresentaram históricos comprovados de contaminação; b) *Suspeitos*: postos com anomalias de baixa reflexão no sinal do GPR, mas sem relatos de vazamento de combustível; e c) *Não contaminados*: postos sem anomalias de GPR e sem relatos de vazamento.

### **3.1.2 Princípios do GPR**

O método de radar de penetração no solo (GPR – *Ground Penetrating Radar*) consiste em obter uma imagem de alta resolução da subsuperfície, através da transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas de altas frequências (10 MHz - 2,5 GHz), visando localizar áreas contaminadas, estruturas sedimentológicas ou localizar objetos enterrados pelo homem (DAVIS & ANNAN, 1989; DANIELS, 1996; PORSANI, 1999), dentre outras.

O método GPR é sensível a meios onde a condutividade elétrica é elevada, fator que pode causar forte atenuação do sinal e, desta forma, limitar a profundidade de penetração da onda eletromagnética. Meios mais argilosos, onde existam contaminantes (inorgânicos ou orgânicos, em processo de biodegradação avançado) podem gerar atenuação do sinal (SAUCK et al., 1998; WERKEMA et

al., 2000), pois modificam a condutividade elétrica do meio, tornando-a mais elevada.

O pulso eletromagnético do GPR é emitido no solo por uma antena transmissora, sendo que parte deste sinal transmitido é refletido devido aos contrastes nas propriedades elétricas dos materiais (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética) e recebido em uma outra antena denominada antena receptora (Figura 3.1).

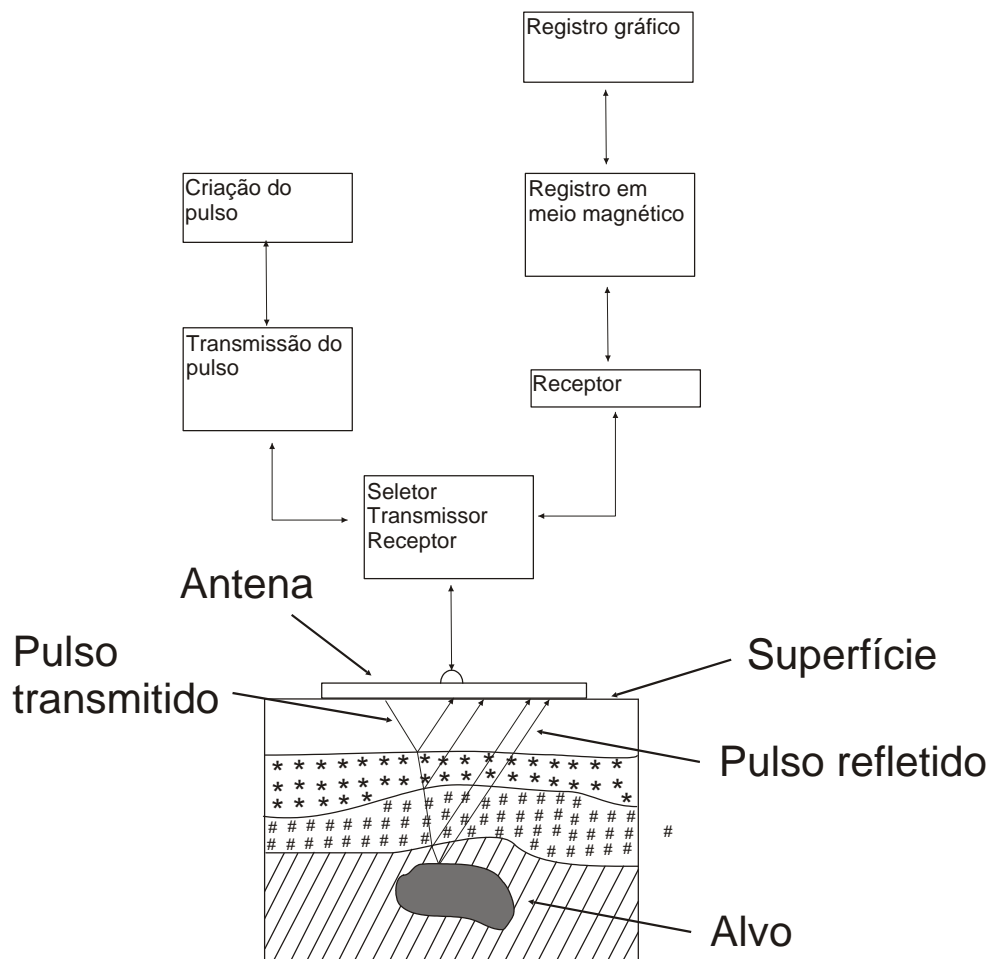


Figura 3.1: Princípio de funcionamento do GPR.

O método GPR está embasado na teoria da propagação e atenuação das ondas eletromagnéticas no meio. Os principais fatores que regem esta teoria são a condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética.

A amplitude da energia refletida versus tempo de percurso é função: i) da quantidade de energia transmitida dentro do terreno, ii) da velocidade de propagação da onda eletromagnética através dos materiais, iii) do contraste nas constantes dielétrica das diferentes interfaces, iv) da atenuação do sinal, v) da profundidade dos refletores de subsuperfície (DAVIS e ANNAN, 1989).

A técnica de aquisição de dados de GPR é semelhante à técnica de reflexão sísmica e técnica do sonar, tanto nos princípios físicos e metodologia de campo, porém o GPR fundamenta-se na transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas (PORSANI, op. cit.).

### **3.1.3 Propagação de Ondas Eletromagnéticas**

A teoria eletromagnética esta fundamentada nas equações de Maxwell, que descrevem o comportamento do campo eletromagnético em qualquer meio. As relações constitutivas do meio relacionam o campo elétrico externo aplicado ao campo interno pelas propriedades elétricas (condutividade elétrica e permissividade dielétrica) e magnética (permeabilidade magnética) dos materiais (STRATTON, 1941).

No método GPR utiliza-se um dipolo elétrico horizontal como fonte do campo de ondas eletromagnéticas (ANNAN & COSWAY, 1992). A equação da onda

plana para o campo elétrico, supondo o fluxo de corrente numa dada direção-x, é dada por:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = k^2 E_x \quad (1)$$

onde,

- $E_x$  é o campo elétrico na direção - x
- “k” é o numero de onda

sendo,

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon - i \omega \mu \sigma \quad (2)$$

onde,

$\omega^2 \mu \epsilon \Rightarrow$  Corrente de Deslocamento  $\Rightarrow$  **Método GPR**

$i \omega \mu \sigma \Rightarrow$  Corrente de Condução  $\Rightarrow$  **Métodos Eletromagnéticos “EM”**

ou pode ser reescrito como:

$$k = \alpha + i\beta \quad (3)$$

onde:

- $\alpha$  corresponde à constante de atenuação:



$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1 \right)} \quad (4)$$

- $\beta$  corresponde à constante de propagação:

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right)} \quad (5)$$

Para as frequências do GPR (10 – 2500MHz),  $\alpha$  e  $\beta$  podem ser re-escritos como:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (6)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (7)$$

Os fatores mais importantes que governam a propagação da onda Eletromagnética num determinado meio são a velocidade e a atenuação

A constante de atenuação normalmente é expressa por:

$$\alpha = 1,636 \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (8)$$

em dB/m e  $\sigma_0$  é a condutividade elétrica em corrente contínua em mS/m. A equação (8) mostra que a condutividade possui grande influência na constante de atenuação.

A velocidade ( $v$ ) da onda eletromagnética é uma função da frequência ( $f$ ), pode ser descrita por:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{(\mu_r \epsilon_r) \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma / \omega \epsilon)^2}}{2}}} \quad (9)$$

onde,

- $C_0$  é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s).
- $\sigma / \omega \epsilon$  é o fator de perda.
- $\sigma$  é a condutividade elétrica do material.
- $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular (rad/s).
- $\epsilon_r$  é a razão entre a permissividade dielétrica do material ( $\epsilon$ ) com a permissividade dielétrica no vácuo ( $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ ), e dada por.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (10)$$

- $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa do meio, e dada por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (11)$$

O efeito da variação da permeabilidade magnética não é considerado quando são feitas medidas na terra, por admitir-se que a mesma não varia significativamente em relação à permeabilidade magnética do espaço livre

(OLHOEFT, 1981; KELLER, 1987). Contudo, os efeitos de uma forte permeabilidade magnética não podem ser totalmente ignorados no método GPR (ANNAN,1992).

Para estudos de radiação de ondas eletromagnéticas na Terra é suposto que:

- I. A terra é um meio isotrópico, horizontalmente estratificado, com extensão lateral infinita.
- II.  $\epsilon$  e  $\mu$  são constantes e independentes do tempo, sendo  $\mu \approx \mu_0$  para a maioria das rochas, onde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m é a permeabilidade magnética no espaço livre (ANNAN, 1996). Com isso temos que  $\mu_r = 1$ .

Para materiais geológicos de baixa perda, como areia e cascalho, a influência de  $\sigma$  na variação da frequência do GPR (10 MHz – 2,5 GHz) é mínima, com isso podemos dizer que  $\sigma/\omega\epsilon \approx 0$  (DAVIS & ANNAN, 1989; REYNOLDS, 1997).

Substituindo  $\sigma/\omega\epsilon=0$ , e  $\mu_r=1$  na equação da velocidade da onda eletromagnética (9), pode ser simplificada para:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (12)$$

onde  $C_0 \approx 0,3$  m/ns.

Dentre as feições que causam mudanças abruptas da velocidade e condutividade no sinal do GPR, gerando as reflexões visualizadas em uma seção de Radar, encontram-se as seguintes feições em subsuperfície, cavidades vazias, túneis, tanques, tubulações, mudanças na litologia e porosidade das rochas, nível d'água e a presença de hidrocarbonetos, em especial os de densidade menor do

que a água ou LNAPL (light nonaqueous phase liquids), por flutuarem sobre o nível d'água é possuírem constante dielétrica diferente do meio. Whiteley (1995) frisa que a constante dielétrica é reduzida pela adição de hidrocarbonetos.

### 3.1.4 Coeficiente de reflexão

Quando a onda eletromagnética propagada em subsuperfície encontra uma descontinuidade significativa em relação a  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  e  $\sigma_r$ , parte de sua energia é refletida. O poder de reflexão é proporcional à variação da magnitude (REYNOLDS, 1997; VAN DAN, 2001).

O valor da energia refletida, em relação à amplitude do sinal, é dado pelo coeficiente de reflexão (R). Assumindo que  $\sigma$  e  $\mu$  são desprezíveis devido à elevada frequência do GPR, tem-se.

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad (9)$$

onde  $\epsilon_{r1}$  e  $\epsilon_{r2}$  são as permissividades dielétricas relativas das camadas 1 e 2, ou:

$$R = \frac{\sqrt{v_2} - \sqrt{v_1}}{\sqrt{v_2} + \sqrt{v_1}} \quad (10)$$

onde  $v_1$  e  $v_2$  são as velocidades das camadas 1 e 2.

Geralmente, tanto em rochas, sedimentos e solos, valores de baixa permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) resultam em altos valores de velocidade (v), e baixos

valores de condutividade ( $\sigma$ ) resultam em baixos valores de atenuação ( $\alpha$ ). Isto é, no método do GPR, tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica afetam diretamente na atenuação e propagação das ondas de radar, respectivamente (ANNAN, 1996). Em geral, a condutividade é dominante para ondas Eletromagnéticas (EM) de baixas frequências ( $< 1\text{MHz}$ ) enquanto que, para altas frequências ( $\geq 1\text{MHz}$ ), a permissividade dielétrica é dominante (WARD & HOHMANN, 1987).

### 3.1.5 Profundidade de penetração

Os fatores que influenciam a profundidade de penetração do sinal de GPR durante a propagação das ondas eletromagnéticas estão relacionados à perda de energia devido o espalhamento geométrico, a atenuação pelo terreno e a partição da energia nas interfaces.

A profundidade de investigação e resolução do GPR variam de acordo com a frequência da antena. Quanto maior a frequência, maior será a resolução vertical e menor será a profundidade de investigação, e vice-versa (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Frequência central das antenas x Profundidade máxima de penetração (IDSGRED, 2003).

Frequencia Central (MHz)	Profundidade de Penetração (m)
600	1,5
200	4
100	6

### 3.1.6 Técnicas de determinação da velocidade do meio

Para estimar a velocidade das ondas do GPR no meio existem as técnicas de sondagem de velocidade do tipo CMP (*Common Mid Point*) e WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*).

Na técnica do CMP, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos, partindo de um ponto central fixo. Na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira.

A velocidade também pode ser obtida quando se tem o conhecimento de um alvo (geológico ou material) em subsuperfície cuja profundidade seja conhecida, e com isso, converter o tempo duplo dos perfis de reflexão em profundidade através da expressão abaixo:

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

onde

v é a velocidade da onda de radar no meio (m/ns)

h é a profundidade (m)

t é o tempo duplo nos perfis GPR (ns)

## **3.2 Método da Eletrorresistividade**

### **3.2.1 Histórico da Eletrorresistividade**

O desenvolvimento dos métodos geoeletricos tem origem do século XVIII com trabalhos de GRAY e WHELLER (1720) sobre a resistividade das rochas, e o descobrimento por Wheller que o solo é condutor (ORELLANA, 1972).

Com o fim da Primeira Grande Guerra em 1918, deu-se o início da evolução dos métodos elétricos que se estendem até os dias de hoje. Esta evolução é atribuída às diferentes escolas de pensamento: A escola franco-soviética(irmãos Schulumberger), e a escola Wenner (americana).

A eletrorresistividade é um método geoeletrico baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais, tendo sido utilizado nos mais variados campos de aplicação geofísica.

No Brasil, com a evolução tecnológica dos equipamentos geoeletricos, um grande número de trabalhos científicos foi publicado em diversas áreas da geologia (BRAGA, 1997; BORGES & GOMES, 1999), Hidrogeologia (CUTRIM, 1999; CUTRIM et al, 2001), geotecnia (GALLAS et al, 2001; BRAGA, 1997), meio ambiente (ELIS, 1999; SHIRAIWA et al 2001), dentre outros.

### **3.2.2 Princípios Teóricos**

O método da eletrorresistividade baseia-se no estudo do potencial elétrico tanto dos campos elétricos naturais, existentes na crosta terrestre, como dos campos artificialmente provocados. A partir de medições do potencial elétrico na superfície pode-se determinar, no subsolo, a existência de corpos minerais e reconhecer estruturas geológicas (TELFORD et al.1990).

No ambiente geológico, os diferentes tipos litológicos existentes, apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico da resistividade elétrica. Um mesmo tipo litológico pode apresentar uma ampla gama de variação nos valores de resistividade devido aos inúmeros fatores que interferem no valor da resistividade de um determinado material.

As rochas ígneas e metamórficas possuem tipicamente alta resistividade, dependendo do seu grau de fraturamento e da porcentagem de fraturas preenchidas com água subterrânea. Nas rochas sedimentares, quando saturadas em água, apresentam baixos valores de resistividade, assim como os solos úmidos e a própria água subterrânea. Para os solos secos temos que os argilosos normalmente apresentam menores valores de resistividade do que os solos arenosos, entretanto é comum a sobreposição de valores de resistividade entre todas as diferentes classes de solos e rochas, devido aos inúmeros fatores como a porosidade, grau de saturação em água e em especial a concentração de sais dissolvidos (LOKE, 1999). A tabela 4.1 apresenta as faixas de variações mais freqüentes, nos valores de resistividade para alguns tipos de sedimentos e rochas.



Tabela 4.1: Valores de resistividades de alguns tipos Litológicos (adaptada de Braga, 2003).

TIPO LITOLOGICO	RESISTIVIDADE (Ohm.m)
Zona não saturada	100 a 30.000
Argiloso	≤ 20
Argilo - Arenoso	20 a 40
Areno - Argiloso	40 a 60
Siltito Argiloso	10 a 60
Arenoso	≥ 60
Argilito	10 a 20
Arenito	80 a 200
Basalto / Diabásio	200 a 500
Calcário	500 a 1.000
Granito / Gnaisse	3.000 a 5.000

### 3.2.3 Conceitos fundamentais da resistividade elétrica

Diversos autores discutem os princípios teóricos e práticos da eletrorresistividade. Entre eles destacam-se Parasnis (1970), Orellana (1972) e Telford et al. (1990).

A resistividade é a medida que um determinado material impõe à passagem da corrente elétrica ou, o inverso, a condutividade é a facilidade com que a corrente elétrica passa através de um certo material. A resistividade é designada por ( $\rho$ ), dada em Ohm.m e a condutividade ( $\sigma$ ), dada em S/m, sendo a relação entre elas  $\rho = 1/\sigma$ .

A resistividade é dada pela Lei de Ohm:

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{L}{A} \quad (11)$$

onde  $A$  é a área da superfície da amostra,  $L$  é o comprimento da amostra,  $\Delta V$  é a diferença de potencial entre as faces da amostra e  $I$  é a intensidade de corrente que passa através da amostra.

Um dos problemas que encontramos ao realizarmos uma prospecção através do método da resistividade elétrica é que o meio não é homogêneo (com diferenciações na forma, dimensão, geometria e nos tipos de materiais geológicos). Sabemos que a superfície da terra é heterogênea e anisotrópica e que os valores de área e comprimento do material dependem da geometria do arranjo dos eletrodos, sendo estes substituídos na equação por uma constante  $K$  (Equação 12).

A resistividade medida é a resistividade aparente que um meio teria se fosse homogêneo, isto é, ela reflete apenas as propriedades médias do meio pelo qual a corrente passou, sendo expressa por:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (12)$$

onde  $K$  é o fator geométrico que depende do arranjo dos eletrodos. Num perfil de caminhamento elétrico ele é expresso por:

$$K=2\pi Ga \quad (13)$$

Sendo:

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} + \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (14)$$

Desenvolvendo esta equação temos:

$$K = \pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot a \quad (15)$$

onde:

$\rho_a$  - é a resistividade aparente da subsuperfície

$K$  - é o fator geométrico que depende do espaçamento entre os eletrodos (AB e MN)

$\Delta V$  - é a diferença de potencial entre os eletrodos MN

$I$  - é a corrente injetada pelos eletrodos AB

$n$  - é o nível de investigação em profundidade

$a$  - é a distância entre os eletrodos.

Para as medidas de resistividade é utilizado um sistema de quatro eletrodos sendo que dois deles (A e B) são utilizados para enviar uma corrente elétrica ( $I$ ), e os outros dois são utilizados para medir a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre eles.

### 3.2.4 Técnicas de Aquisição

As técnicas de desenvolvimento de campo dos métodos geoeletrico, podem ser de três tipos principais: Sondagem elétrica vertical (SEV), o Caminhamento elétrico (CE) e a Perfilagem Elétrica (PERF). A diferença entre estas técnicas, está no procedimento de campo para se obter o parâmetro físico a ser estudado, ou

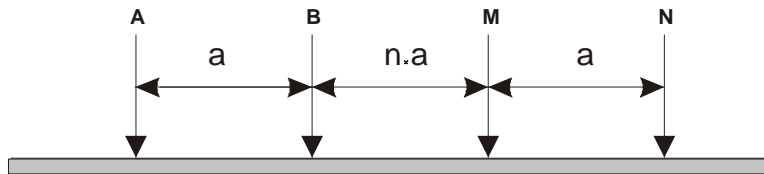
seja, na disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou interior de furos de sondagens e a maneira de desenvolvimento dos trabalhos para se obter os dados de campo, ligada aos objetivos da pesquisa (BRAGA, 2003).

Nesta dissertação foi utilizada a técnica do Caminhamento Elétrico através do arranjo Dipolo – Dipolo, pois em estudos ambientais este arranjo é um dos mais utilizados nos trabalhos de campo, devido a sua rapidez e praticidade (REYNOLDS, 1997). A sua principal utilidade consiste no mapeamento da variação lateral e em profundidade da condutividade elétrica do meio, podendo caracterizar plumas de contaminação.

- *Arranjo Dipolo – Dipolo*

Este tipo de arranjo é um dos mais precisos e rápidos de serem executados no campo. Sua vantagem deve-se ao fato de que, o estudo da variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis de profundidades obtendo-se uma caracterização dos materiais, em subsuperfície, tanto horizontalmente quanto verticalmente.

Neste Arranjo, os eletrodos AB de injeção de corrente e MN de potencial são dispostos em uma linha e o arranjo é definido pelos espaçamentos entre os eletrodos (Figura 3.2).

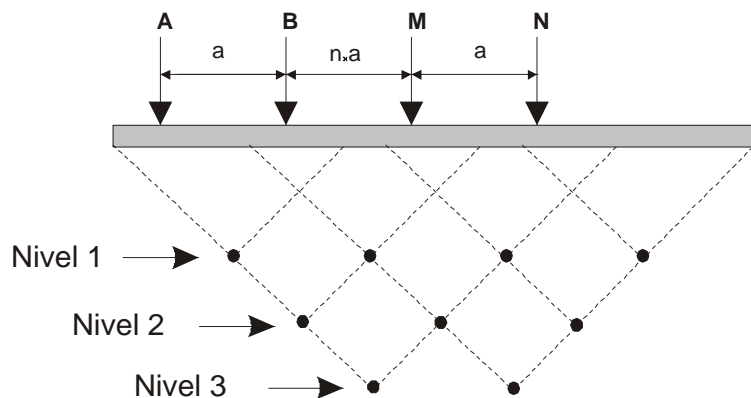


**Figura 3.2** - Disposição dos eletrodos no arranjo Dipolo-Dipolo, onde (a) é a distancia fixa entre os eletrodos em cada par, e (n) é o nível de investigação.

As principais características do arranjo dipolo-dipolo são:

- Espaçamento entre os eletrodos AB e MN são iguais
- Os centros dos dipolos AB e MN não permanecem fixos se deslocando ao longo da linha a ser levantada.

No arranjo Dipolo – Dipolo conforme aumenta a distância entre os eletrodos de corrente (AB) e os de potencial (MN) as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação (n), isto é,  $n= 1, 2, 3, 4, 5\dots, X$ . A profundidade de investigação é determinada no ponto de intersecção ente uma linha que parte do centro do arranjo de eletrodos AB e outra que parte do arranjo MN, com ângulo de  $45^{\circ}$  (Figura 3.3).



**Figura 3.3** – Distribuição dos pontos medidos em profundidade para o arranjo Dipolo-Dipolo.

### 3.3 Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs)

Os compostos orgânicos voláteis (VOC) são vapores orgânicos presentes nos poros do solo, provenientes da volatilização de combustíveis adsorvidos no solo ou em fase livre sobrenadante ao nível freático.

Para a caracterização de concentrações anômalas de vapores orgânicos no solo e verificar a possível pluma de contaminação detectadas através dos métodos geofísicos, utilizou-se esta metodologia, na qual consistiu das seguintes etapas:

- Estabelecimento da rede de pontos de amostragem

Nessas áreas os pontos de amostragem foram localizados partindo-se de dados obtidos na investigação confirmatória utilizando a geofísica, através dos métodos (GPR) e Eletroresistividade (Caminhamentos Elétricos) e também onde se considerou que havia maior probabilidade de ocorrência de vazamento de combustíveis, tais como entre os tubos de descarga à distância e os tanques; entre linhas de sucção de combustível; próximos às unidades de abastecimento (bombas); entre os tanques; próximos aos sistemas de filtragem de diesel e próximos às bandejas e bicos.

- Coleta e medição de gases no solo

A perfuração da superfície do concreto e do solo foi realizada por meio de furadeira elétrica ou trado manual e a coleta de gases foi realizada através de uma sonda constituída de um tubo aberto de pequeno diâmetro (2,5 cm) e uma mangueira de material plástico (teflon). A sonda

foi cravada um metro abaixo da superfície do terreno, sendo parcialmente retirada (aproximadamente 0,20 m) ao ser atingida essa profundidade foi realizada a medição por meio de um analisador de gases adaptado à mangueira.

O equipamento utilizado foi um THERMO GAS TECH, modelo INNOVA SV. Antes de efetuar cada leitura verificamos a leitura do zero do equipamento. No momento das medições eliminamos metano ( $\text{CH}_4$ ) e hidrogênio (H); gases que podem interferir na leitura e avaliação do solo. Ao final da medição de gases, os furos foram preenchidos, evitando-se que os produtos que eventualmente sejam derramados na pista e no solo atinjam o subsolo. Em relação ao sulfeto de hidrogênio, não foi determinada sua existência, mesmo em locais próximos da rede de esgoto (Fotografia 3.1).



Foto 3.1 – Monitor de Vapores – *GASTECH INNOVA-SV*

## 4 Aquisição e Tratamento dos dados

### 4.1 Aquisição dos dados

Os levantamentos geofísicos, bem como, a aquisição de dados de compostos orgânicos voláteis (VOC) realizados nas áreas A e B do centro de abastecimento de locomotivas (Figura 2.1) foram executados durante o mês de junho de 2004

Para a aquisição dos dados de GPR foi utilizado um equipamento multifreqüencial modelo RIS 2K/MF de fabricação italiana pela IDS RADAR. As antenas de 200 e 600 MHz foram utilizadas e suas medidas foram feitas através de 8 canais com diversos arranjos das antenas transmissoras e receptoras (monostático, biestático e polarização cruzada), bem como uma antena monostática de 100 MHz.

O arranjo monoestático compreende um sistema onde a antena transmissora está unida à antena receptora, isto é, não há separação entre elas, já no arranjo biestático existe uma separação entre as antenas transmissora e receptora. Nos arranjos monostáticos e biestáticos as antenas transmissoras e receptoras encontram-se paralelas. No arranjo da polarização cruzada as antenas transmissoras e receptoras encontram-se perpendiculares uma em relação à outra

Figura 4.1.



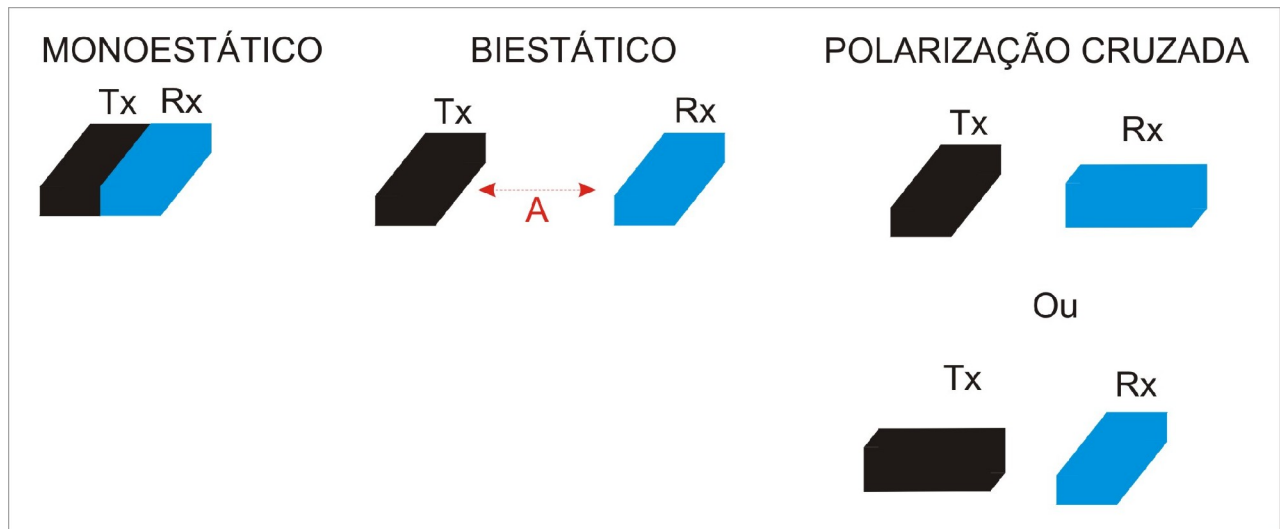


Figura 4.1: Arranjos das antenas contidos no GPR multifrequencial

O levantamento com o GPR realizado nas áreas A e B totalizou de  $3.063\text{m}^2$ . Nas duas áreas os dados foram adquiridos em linhas transversais e longitudinais, determinadas por uma linha de referência (marco zero), previamente determinada, com pontos equidistantes a cada 2 metros. Os parâmetros utilizados na aquisição foram os mesmos para as duas áreas sendo para as antenas de 200 e 600 MHz, 512 o número de amostras por traço, 128 ns a janela de tempo e o espaçamento entre os traços foi de 2,5 cm obtendo uma melhor resolução horizontal do sinal no perfil. Para a antena de 100MHz os parâmetros utilizados foram 512 o número de amostras por traço, 256 ns a janela de tempo e o espaçamento entre os traços de 2,5 cm.

Para a aquisição dos dados de eletrorresistividade foi utilizado um Resistímetro "TECTROL" (conversor DC/DC) de fabricação nacional, cujo equipamento possui mesmo nome do fabricante, que possui corrente de saída

variando entre 0,5 e 1,0 A e tensão comutável entre 0 e 1000V. As medidas de corrente foram realizadas no próprio equipamento e as medidas de tensão foram feitas em um multímetro acoplado ao sistema. Na aquisição com o método da eletrorresistividade foram definidas 8 linhas de Caminhamento Elétrico com arranjo Dipolo-Dipolo nas áreas “A” e “B” totalizando uma área de 4.214m<sup>2</sup> e 436m lineares.

Para o estudo de VOC nas áreas “A” e “B” foram realizadas um total de 51 sondagens investigatórias. Foi utilizado um monitor de Vapores modelo INNOVA SV de fabricação da THERMO GASTECH, com calibração realizada na data de 15/06/04 pela empresa Clean Enviroment Brasil.

Para um melhor entendimento das áreas investigadas, a seguir será apresentado um detalhamento dos procedimentos de aquisição dos dados pelas áreas de levantamento.

#### **4.1.1 Área “A” - tanques de armazenamento de combustíveis**

##### **4.1.1.1 GPR (*Ground Penetrating Radar*)**

Na área “A” foram levantadas 27 linhas de GPR Multifrequêncial sendo 14 linhas longitudinais (paralelas à linha de referência) e 13 linhas transversais (perpendiculares) com 8 canais de investigação para cada linha (Figura 4.2). Isto gerou um total de 216 seções de GPR sendo que são 81 seções de 200 MHz (sendo 27 seções com o arranjo monostático e 54 seções com o arranjo Biestático) 108 seções GPR de 600 MHz de arranjo monostático e 27 seções de polarização cruzada e 27 Seções GPR de polarização cruzada com a antena

transmissora de 600 MHz e a receptora de 200 MHz. Um segundo levantamento de GPR foi realizado na área "A" com uma antena monostática de 100 MHz com o intuito de atingir profundidades maiores. A aquisição foi realizada em uma malha de 2x4, onde foram adquiridas 39 linhas de GPR, sendo 26 seções longitudinais a linha de referência e 13 seções transversais (perpendiculares à linha de referência).

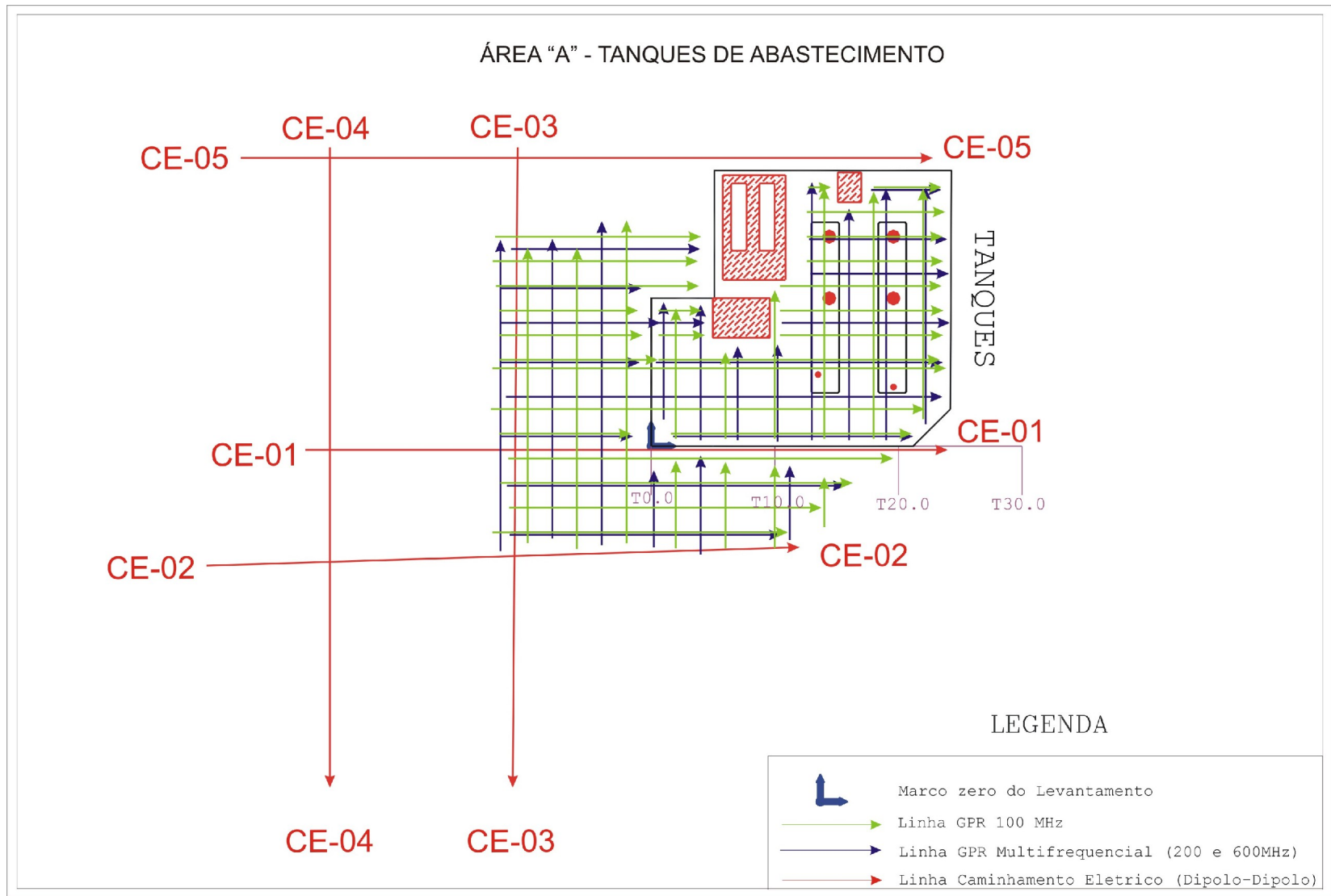


Figura 4.2: Mapa de linhas de aquisição geofísica para a área "A" – Tanques de Armazenamento de Combustíveis

#### **4.1.1.2 Eletrorresistividade**

As linhas de aquisição foram dispostas ao redor da área de estudo, visando identificar a existência ou não de pontos anômalos característicos de contaminação provenientes dos tanques enterrados.

Foram definidas 5 linhas de Caminhamento Elétrico – CE's com arranjo dipolo-dipolo, sendo elas definidas como os CE's 1, 2 e 5 paralelos entre si, e perpendiculares a estas os CE's 3 e 4, totalizando uma área de 2.428 m<sup>2</sup> e 336m lineares (Figura 4.2).

A distância entre os eletrodos foi de 4m visando atingir uma profundidade teórica de aproximadamente 7m. Com o objetivo de ter dados mais confiáveis durante a aquisição foram utilizados eletrodos de cobre, e água foi jogada ao redor deles, para um melhor acoplamento dos eletrodos, diminuindo a resistência de contato, que pode causar ruído ao dado captado.

#### **4.1.1.3 Compostos Orgânicos Voláteis (VOC)**

Nesta área foram realizadas um total de 37 pontos de amostragem situados em áreas desobstruídas, dispostos conforme uma malha com espaçamento de no máximo 5 metros, (Figura 4.3).

**Figura 4.3** – Malha dos furos da Coleta de VOC da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.

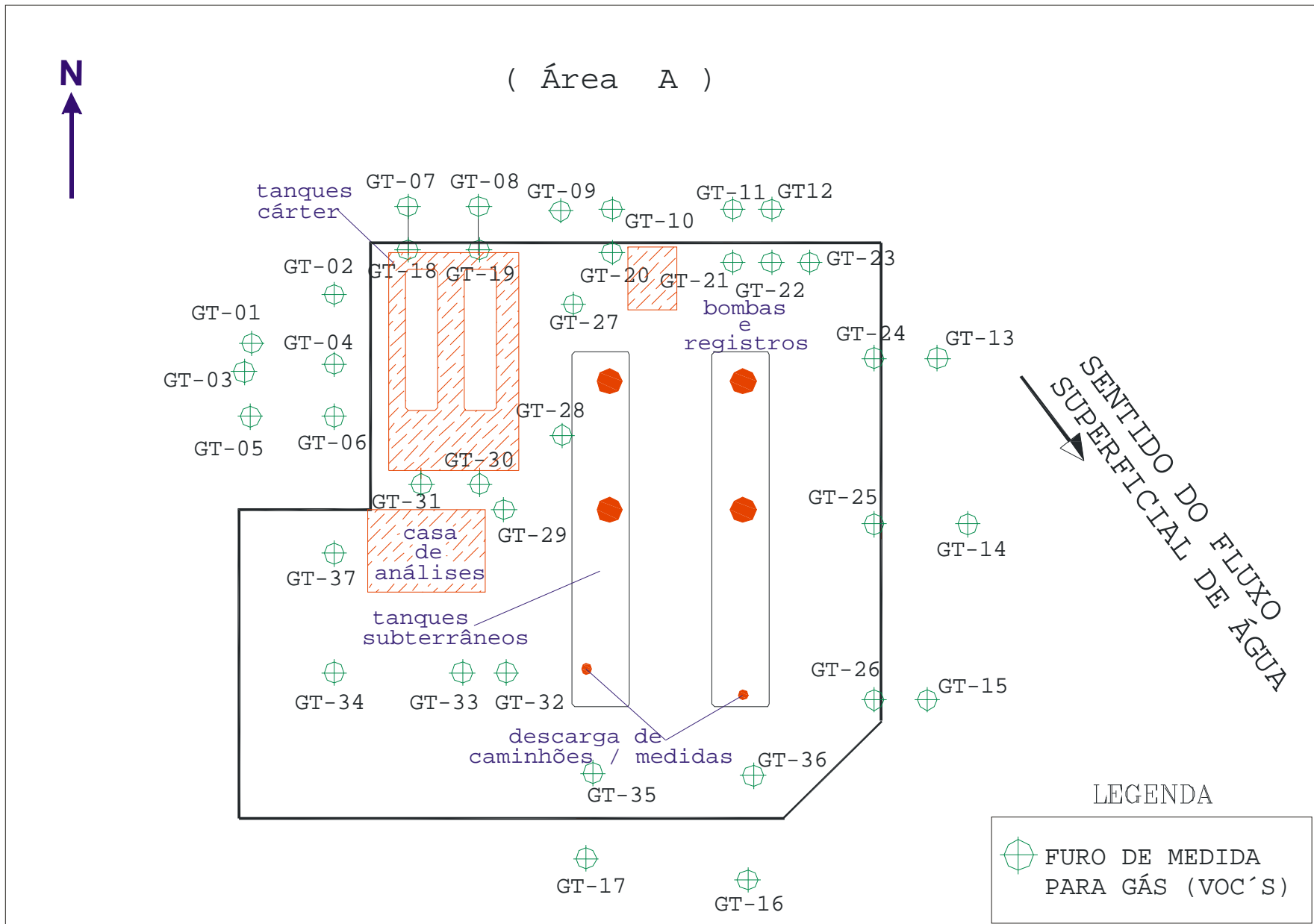


Figura 4.3: Malha dos furos da Coleta de VOC da área "A" – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.

## **4.1.2 Área “B” – Posto de Abastecimento de Locomotivas**

### **4.1.2.1 GPR (*Ground Penetrating Radar*)**

Na área “B” devido a maior dificuldade logística para a execução do levantamento com o GPR foram levantados um total de 15 linhas de GPR Multifrequencial, sendo 8 linhas longitudinais (paralelas à linha de referência) e 7 linhas transversais (perpendiculares a linha de referência) com 4 canais de investigação para cada linha. Foi obtido através destas 15 linhas um total de 60 seções de GPR, com 15 seções de 200 MHz com arranjo monostático, 15 seções GPR de 600 MHz com arranjo monostático, 15 seções GPR de 600 MHz com arranjo de polarização cruzada e 15 Seções GPR de polarização cruzada com a antena transmissora de 600 MHz e a receptora de 200 MHz. Nesta área também foi realizado um levantamento com a antena de 100 MHz buscando atingir maiores profundidades de investigação. Foram adquiridas um total de 40 linhas de GPR com a antena de 100 MHz sendo 21 seções longitudinais a linha de referência e 19 seções transversais (perpendiculares À linha de referência). A Figura 4.4 mostra a disposição dos perfis GPR na área “B”.

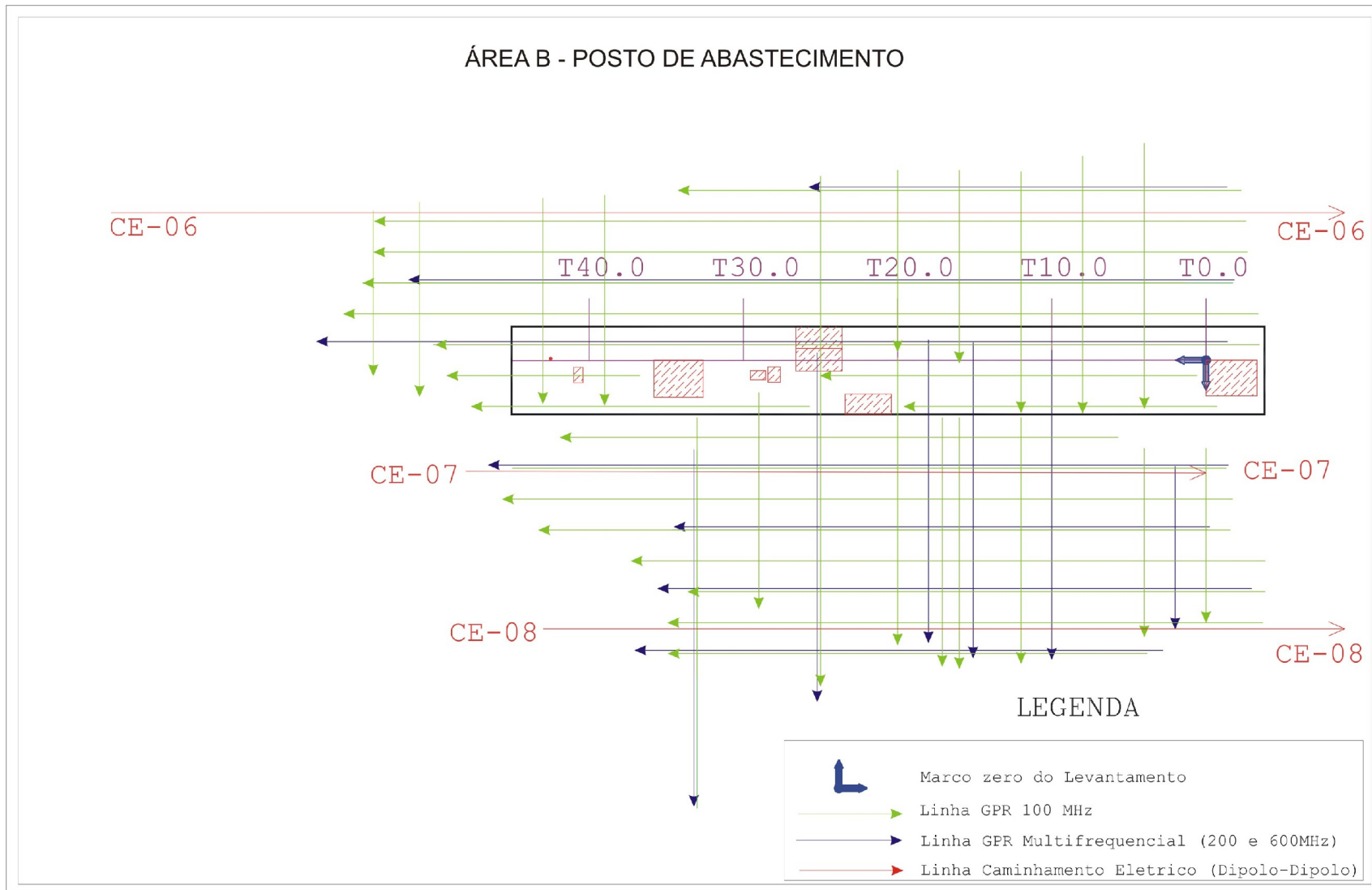


Figura 4.4: Mapa de linhas de aquisição geofísica para a área “B” - Posto de Abastecimento de Locomotivas.



### **4.1.2.2 Eletrorresistividade**

As linhas de aquisição foram dispostas paralelas à área de estudo, visando identificar a existência ou não de pontos anômalos característicos à contaminação provenientes as bombas de abastecimento das locomotivas.

Foram definidas 3 linhas de Caminhamento Elétrico com arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre os eletrodos de 4 metros e profundidade teórica de investigação de aproximadamente 6,8 metros, sendo elas definidas como os CE's 6, 7 e 8 e paralelas entre si, totalizando uma área de 1786 m<sup>2</sup> e 176m lineares.

### **4.1.2.3 Compostos Orgânicos Voláteis (VOC)**

Nesta área foram realizados 14 pontos de amostragem. A Figura 4.5 mostra a posição onde foram realizadas as sondagens na área dos Tanques "B".

A Figura 4.5 mostra a posição onde foram realizadas as sondagens na área "B".

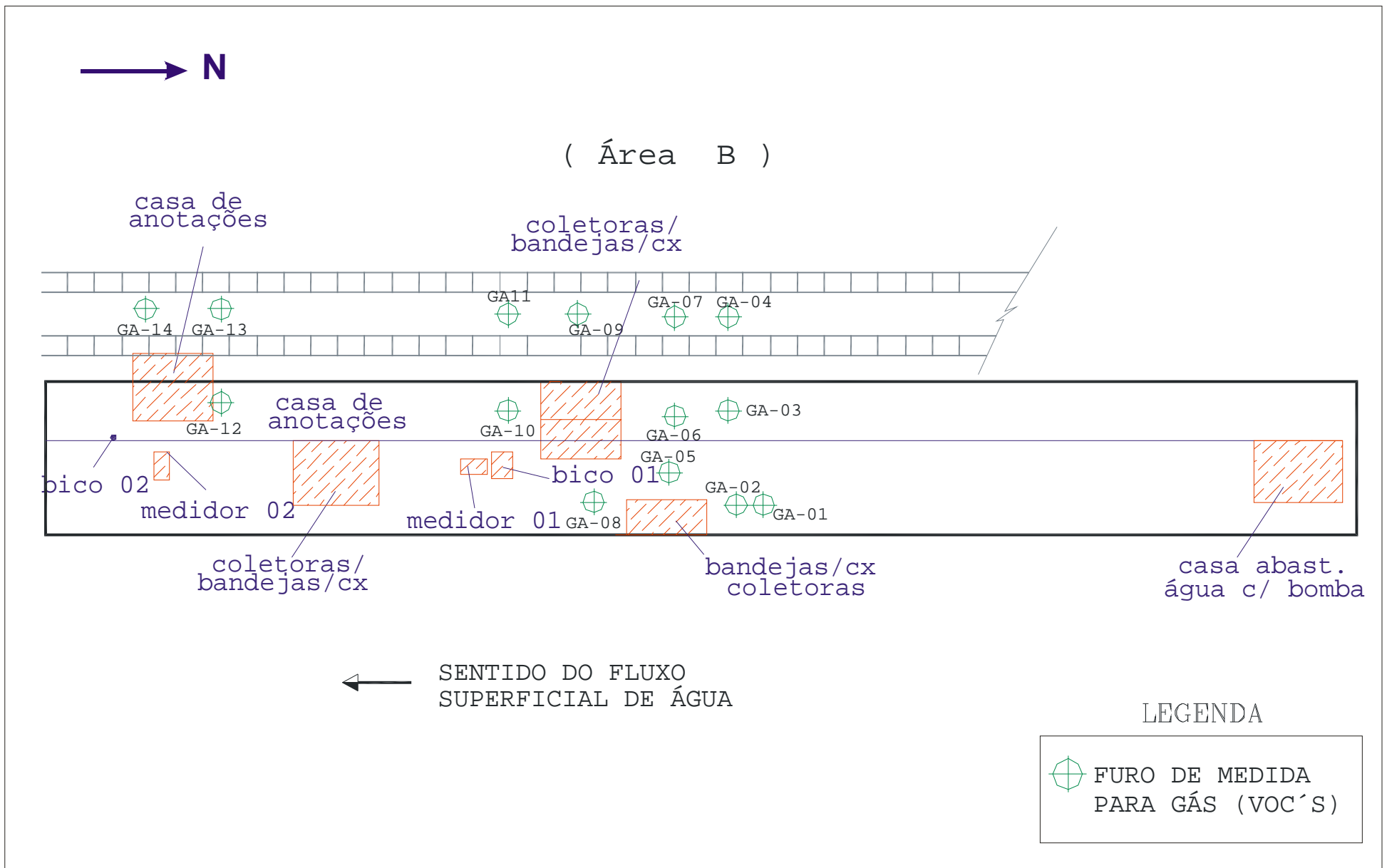


Figura 4.5: Malha dos furos da Coleta de VOC da área "B" - Posto de Abastecimento de Locomotivas.

## 4.2 Tratamento dos dados

### 4.2.1 GPR (*Ground Penetrating Radar*)

O processamento dos dados foi realizado utilizando-se o *software* IDS Gred (IDS) e o Reflex (Sandmeier). A finalidade do tratamento dos dados é melhorar a razão sinal/ruído para gerar melhorias na visualização das anomalias de interesse, uma vez que a propagação do pulso do radar no subsolo sofre atenuações que, somadas a ruídos (naturais e artificiais), podem mascarar os sinais refletidos. O processamento dos dados de GPR, normalmente é realizado de maneira sistemática, podendo realçar certas feições de interesse.

As etapas utilizadas no processamento dos dados foram: ajuste do tempo zero, filtro DC (dewow), filtros passa-banda, ganho linear, remoção de background e conversão tempo/profundidade. O Filtro DC é um filtro temporal utilizado para remover os componentes dos dados de baixa frequência. Frequentemente é denominado como “Dewow”.

O conceito de ganho variando no tempo refere-se a um ganho aplicado aos dados, o qual aumenta com o tempo depois do pulso transmitido. O aumento da função do ganho no tempo é feito para ajustar as partes atenuadas do sinal, aumentando sua amplitude em função do tempo. Existem vários tipos de funções ganho que podem ser aplicadas durante um processamento de dados de GPR. O ganho utilizado no processamento dos dados de GPR para as áreas “A” e “B” foi um ganho linear, que aumenta com o tempo exponencialmente, compensando a atenuação sofrida pelo sinal, preservando a hierarquia de amplitude do mesmo.

A filtragem temporal atua ao longo de um traço, separando e removendo sinais espúrios localizados. O tipos de filtros temporais mais comuns são, os filtros passa banda, passa baixa, e passa alta. Os filtros de banda como são conhecidos consistem em determinar uma banda limitada na frequência onde estão contidos os sinais de maior amplitude e com isso determinar os vértices dos filtros. No processamento dos dados em questão foi utilizado um filtro passa banda onde os vértices determinados variaram para cada frequência da antena utilizada na aquisição dos dados.

No processamento dos dados foram utilizados filtros espaciais do tipo Running Average e Remoção do Background. A filtragem espacial é aplicada ao perfil GPR para remover ou enfatizar diferentes tipos de variação espacial. O “Running average” é um filtro espacial do tipo passa baixa que retém apenas os comprimentos de onda mais longos, realçando a continuidade lateral dos refletores horizontais (estratigrafia), eliminando os refletores inclinados, os pontos de difrações e os ruídos aleatórios. A “Remoção do Background” que é um filtro espacial do tipo passa alta, realça os eventos mais localizados, tais como, os refletores pontuais e os refletores inclinados, eliminando os refletores horizontais (ANNAN, 1993).

Em algumas seções durante o processamento foi aplicado a migração do tipo Kirchhoff, sendo que a velocidade utilizada neste procedimento foi a velocidade de 0,80m/ns. A migração permite reconstituir uma imagem que melhor representa a subsuperfície (SHERIFF, 1991). Na migração as reflexões aparentes identificadas nos perfis GPR são recolocadas em suas verdadeiras posições espaciais de

subsuperfície e as hipérboles oriundas das difrações são colapsadas em um ponto. O bom resultado na etapa da migração dos dados esta diretamente ligada à velocidade estimada da subsuperfície, caso contrario, falsas reflexões podem se criadas neste processo (ANNAN, 1993; FISHER et. Al., 1996).

A conversão tempo profundidade foi realizada baseada na medida do tempo da onda refletida sobre um alvo cuja profundidade era conhecida e na sua conseqüente conversão para a velocidade. A velocidade obtida tanto para a área “A” quanto para a área “B”, foi de 0,08 m/ns.

Através do software IDS GRED foram elaborados dois mapas de atenuação do sinal eletromagnético, sendo um para cada área. O Mapa de atenuação do sinal GPR é um mapa de superfície que caracteriza os pontos com maiores perdas ou ganhos na penetração da onda eletromagnéticas no solo. Em conjunto foram apresentados as tomografias que são mapas de *depht slices* nas profundidades de 0,5 e 1,0m (profundidades em que foram coletadas as amostras de VOC).

#### **4.2.2 Eletrorresistividade**

Os perfis de caminhamentos elétricos dipolo-dipolo, foram realizados com espaçamento entre os eletrodos de 4 metros e 6 níveis de investigação. Esta técnica foi escolhida visando alcançar os objetivos desta pesquisa na busca de descontinuidades laterais e verticais no subsolo que pudessem ser atribuídos à contaminação do meio por derivados de hidrocarbonetos.

Os resultados obtidos referentes à diferença de potencial e a corrente para cada ponto de leitura, foram digitados em uma planilha eletrônica para a obtenção dos valores de resistividade aparente através das formulas matemáticas da lei de Ohm apresentadas na metodologia desta pesquisa (Capítulo 3).

Para o processamento dos dados foi realizada a inversão 2D através do *software* RES2DINV (LOKE, 1998). Este algoritmo subdivide a subsuperfície em um modelo 2D caracterizado por blocos retangulares. A resistividade elétrica é calculada para cada bloco, e a integração dos blocos permite gerar uma seção de resistividade aparente do modelo. A profundidade máxima de investigação utilizada segue a relação apresentada por Edwards (1977), de  $0,25a$ , onde “ $a$ ” é o espaçamento entre os eletrodos em subsuperfície.

A resposta integrada do modelo de resistividade dos blocos 2D é comparada com os valores medidos de resistividade aparente. A medida do erro desta diferença, ou seja, o ajuste entre os dados reais e o modelo sintético visando a obtenção do melhor modelo é determinada pelo método dos mínimos quadrados.

Após o processamento dos dados, mapas de isovalores de resistividades foram elaborados através de um software interpolador, com o intuito de fornecer uma visão espacial das anomalias de resistividade nas áreas estudadas.

### **4.2.3 Compostos Orgânicos Voláteis (VOC)**

Os dados de Compostos Orgânicos Voláteis “VOC” amostrados foram organizados em uma planilha onde estão apresentados paras as profundidades de

0,5m e 1,0m. A planilha apresenta na primeira coluna o nome do ponto de sondagem amostrado; na segunda, terceira e quarta colunas temos respectivamente o horário, a temperatura (em graus Celsius) e a umidade relativa do ar (em porcentagem) em que foram realizadas as coletas dos dados; na quinta e sexta colunas estão apresentados os valores das concentrações de VOC's (em parte por milhão) para as profundidades de 0,5m e 1,0m respectivamente. A Tabela 5.1 mostra um exemplo desta planilha.

Através dos valores obtidos na coleta de Compostos Orgânicos Voláteis "VOC's" foram elaborados quatro mapas de isovalores, sendo que, dois foram para a área "A" - Tanques de Armazenamento de Combustíveis (um para a profundidade de 0,5m e outro para a de 1,0m) e dois para a área "B" – Posto de Abastecimento de Locomotivas (um para a profundidade de 0,5m e outro para a de 1,0m).

Os mapas de isovalores de VOC para as profundidades de 0,5m e 1,0m serviram para identificar as principais zonas de contaminação e com isso confirmar os resultados obtidos através das investigações geofísicas.

## 5 Interpretação dos resultados

Nas duas áreas estudadas: “área - A” - tanques de armazenamento de combustíveis e “área - B” - posto de abastecimento de locomotivas, os resultados dos levantamentos geofísicos de GPR e Eletrorresistividade apresentaram regiões anômalas em termos de atenuação do sinal da onda eletromagnética do GPR e elevados valores de condutividade elétrica. Nas medidas diretas de Compostos Orgânicos Voláteis “VOC” foram identificados 5 pontos na área “A” com valores baixos na concentração de vapores orgânicos em ppm, e na área “B”, das 14 sondagens realizadas 11 apresentaram valores elevados na concentração de vapores orgânicos em ppm. Estas regiões anômalas identificadas na área “B” podem estar associadas à possíveis plumas de contaminação provenientes de derrames no manuseio ou vazamentos de óleo diesel (hidrocarboneto).

Para facilitar a discussão e a visualização dos resultados referentes aos levantamentos geofísicos e ao estudo de concentrações de voláteis orgânicos, os resultados serão apresentados por áreas de investigação. As tomografias foram selecionadas para as profundidades de 0,5m e 1,0m visando uma comparação com os dados de VOC coletados nessas profundidades.

As seções de GPR foram obtidas através de um equipamento multifrequencial onde em uma única linha de levantamento pode-se ter até 8 seções de reflexão com antenas de 200 e 600 MHz. Entretanto, foram selecionadas para a apresentação desta dissertação apenas as seções de 100, 200, 600 MHz mais representativas para as duas áreas estudadas.



## **5.1 Área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis**

Para uma análise detalhada dos resultados GPR foi realizado inicialmente um mapa de atenuação do sinal eletromagnético. A Figura 5.1 mostra a localização das seções GPR e de caminhamentos elétricos, bem como a atenuação do sinal do GPR em 0, 0,5 e 1 m de profundidade. Nesta figura observam-se algumas zonas de atenuação do sinal denominadas de zonas A, B, C, D, E e F (indicada pela cor vermelha, correspondendo a uma elevada condutividade) que podem estar ou não relacionadas com possíveis focos de contaminação por hidrocarbonetos. As seções de radar GPR – 01, 02, 03 e 04 (Figuras 5.2 e 5.3) visam confirmar os pontos anômalos observados na Figura 5.1 através de sinais característicos de atenuação da onda eletromagnética denominados de “Shadow Zones”, i.e., Zonas de Sombra (Sauck, 1999).

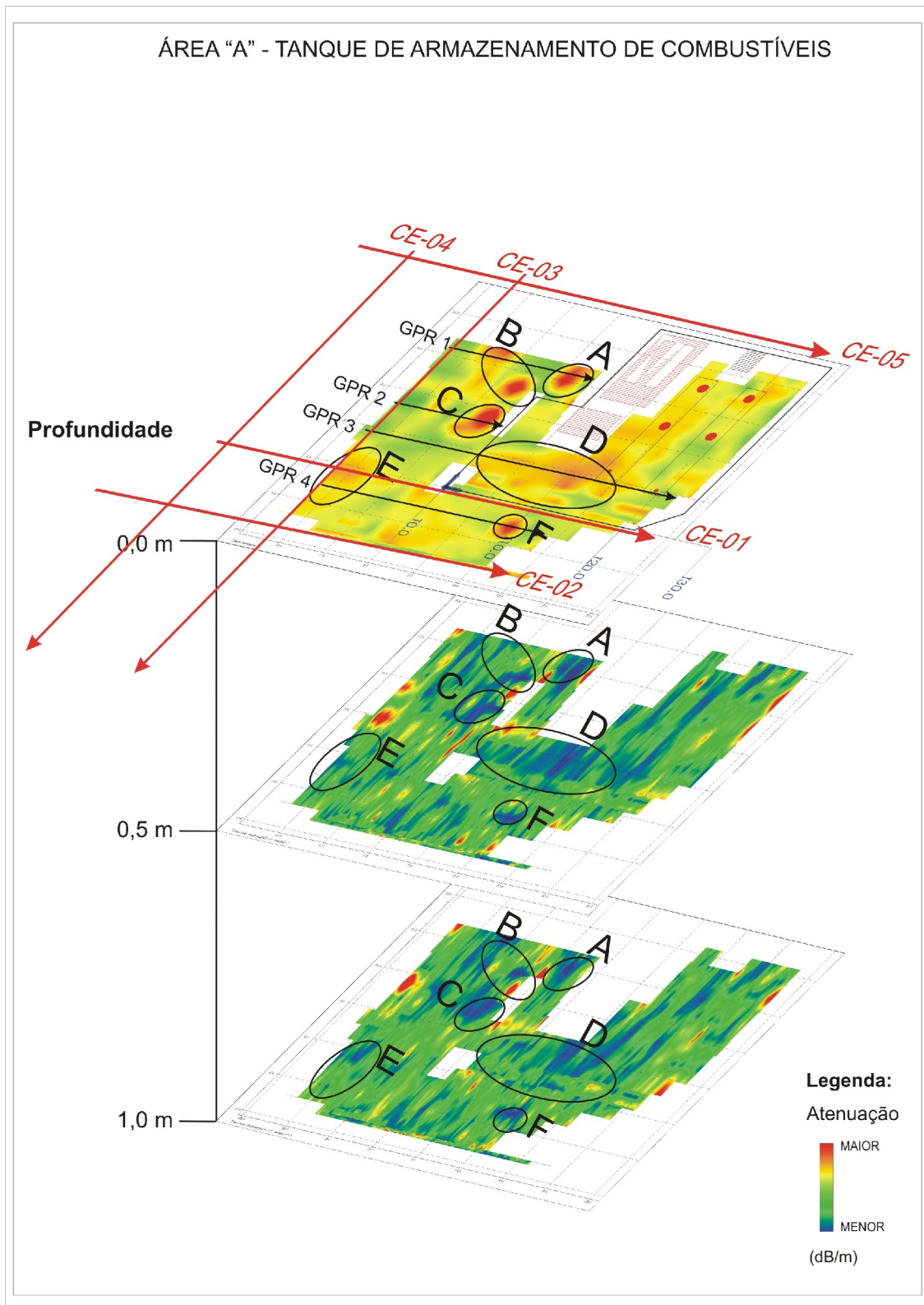


Figura 5.1: Mapa de Atenuação do sinal da área "A" – Tanque de Armazenamento de Combustíveis.

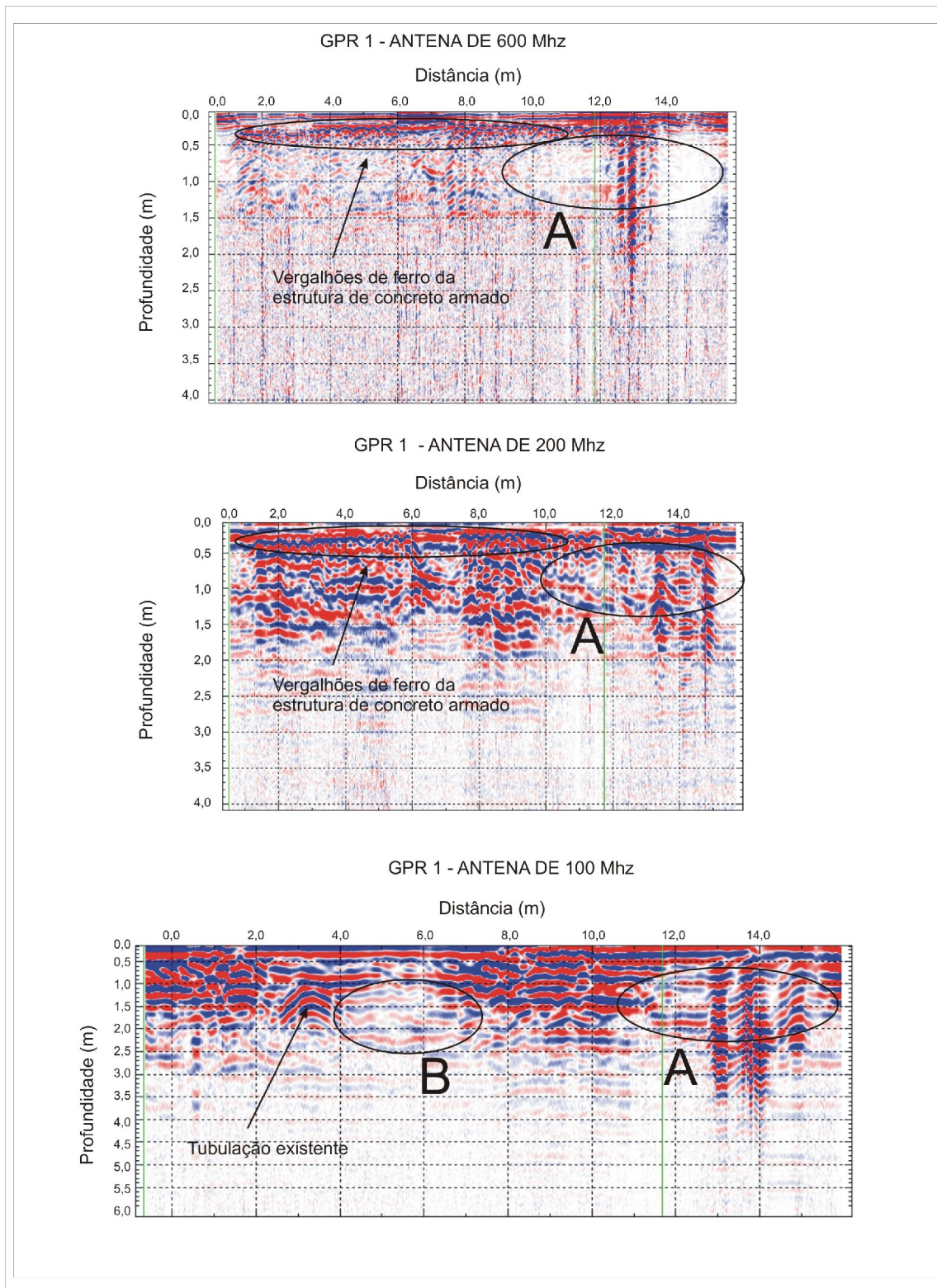


Figura 5.2: Seção GPR - 1 da área "A" – Tanque de Armazenamento de Combustíveis.

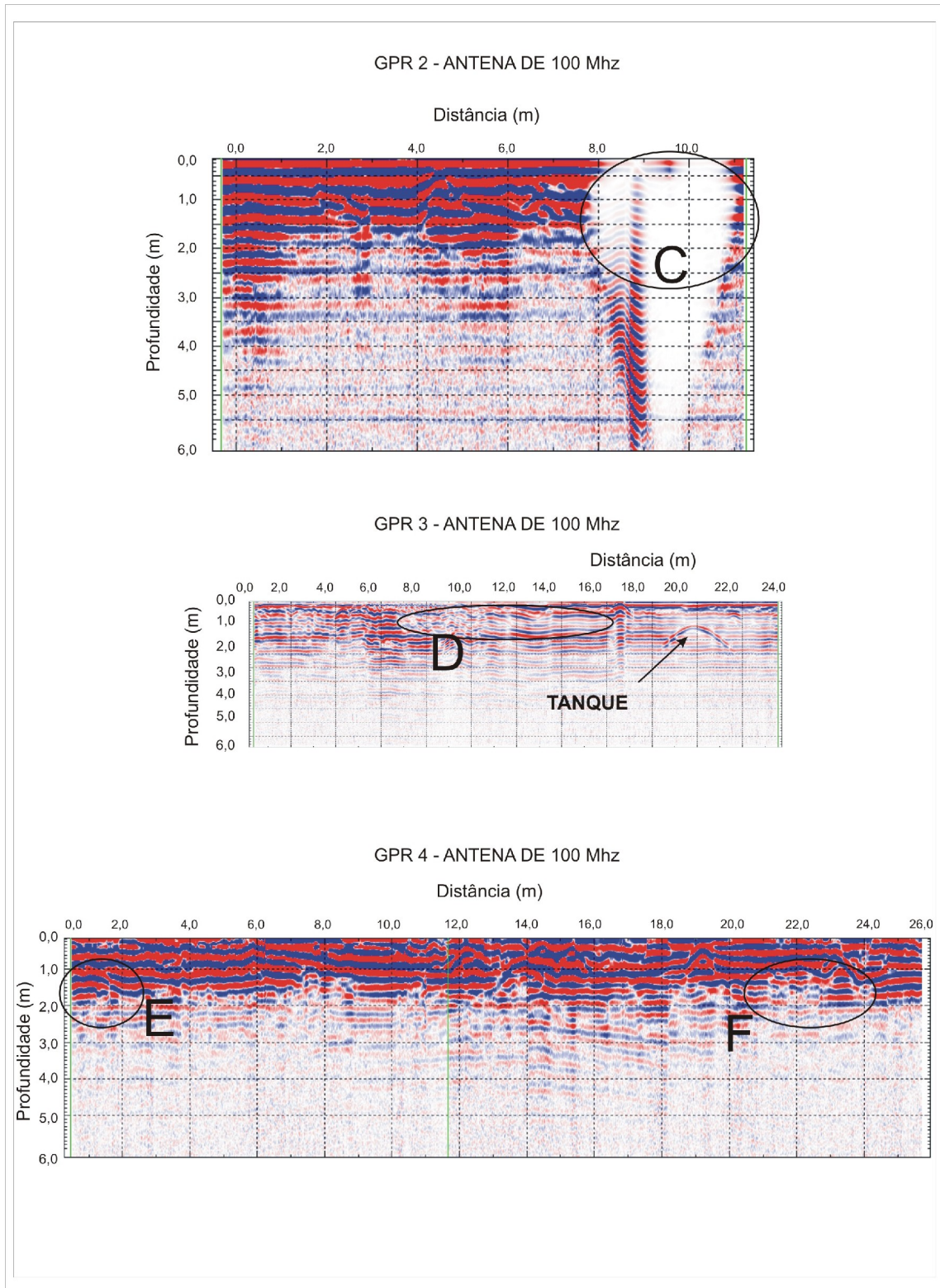


Figura 5.3: Seções GPR – 2, 3 e 4 da área “A” – Tanque de Armazenamento de Combustíveis.

A atenuação do sinal do GPR pode estar relacionada com a presença de materiais mais condutivos. Segundo Sauck (1999), uma pluma contaminante, proveniente de derivados de hidrocarbonetos, pode ocorrer em duas regiões distintas dentro da subsuperfície: a primeira na porção localizada na camada insaturada e a segunda na porção situada abaixo do nível d'água. Na camada insaturada, a pluma contaminante poderá estar presente sob as fases livre e residual, com os sedimentos impactados diretamente pelos hidrocarbonetos, e sob a fase vapor, que é composta por voláteis, presente tanto nos arredores quanto acima da fase livre. Na camada saturada, i.e., abaixo do nível d'água, a pluma contaminante poderá estar presente sob a forma de fase dissolvida, que é subdividida em duas porções: uma aeróbica, devido a entrada da água da chuva oxigenada, bem como do contato com a água subterrânea que também é rica em oxigênio; e a outra anaeróbica, dentro da pluma onde o oxigênio é rapidamente consumido, gerando um ambiente anóxico (i.e., sem oxigênio).

Após a ocorrência de um vazamento, inicialmente são observados valores elevados de resistividade, entretanto, a pluma contaminante (ou seja, o óleo diesel), tanto na fase dissolvida quanto na fase residual, poderá ser afetada por processos químicos, tais como, oxidação/redução, etc., bem como, por processos de biodegradação.

Segundo Sauck (1999), o processo de biodegradação produzirá ácidos orgânicos com alto poder de lixiviação dos sais presentes no solo. Este processo é gradualmente aumentado pela ação bacteriológica sobre o dióxido de carbono liberado após o consumo de oxigênio pelas bactérias presentes, o que também

acarretará a geração de ácidos carbônicos no entorno da camada insaturada, resultando na lixiviação dos sais inorgânicos desta região.

Com isso um material resistivo, como é o caso do óleo diesel, quando encontrado em meio aeróbico e com a água (zona vadosa), acaba recebendo ataques de microorganismos que provocam a sua biodegradação, conseqüentemente gera a produção de sais TDS-Totais de Sólidos Dissolvidos que por sua vez diminuem a resistividade do contaminante. Em outras palavras, um contaminante resistivo poderá ser transformado, ao longo do tempo, em um contaminante condutivo após a ação da biodegradação. Esta é uma fascinante área da Geofísica, denominada de BioGeofísica (KNIGHT, 2001). Importante ressaltar que as respostas elétricas e eletromagnéticas dos poluentes orgânicos dependem da idade da contaminação e das condições geológicas e hidrogeológicas da área estudada.

A localização das seções de caminhamentos elétricos na área "A", i.e., CE's 01, 02, 03, 04 e 05 estão apresentadas na Figura 5.1 e os resultados estão apresentados nas Figuras 5.4 à 5.8, respectivamente. Note que existe uma boa relação entre os dados brutos e o modelo sintético na etapa de processamento, nos fornecendo um resultado mais confiável após o processo de inversão matemática dos dados.

Analisando em conjunto o Mapa de Atenuação de GPR (Figura 5.1) as seções de GPR das Figuras 5.2 e 5.3 e os Perfis de caminhamento elétrico (Figuras 5.4 à 5.8) foi possível delimitar em planta as anomalias condutivas mostradas na Figura

5.9. Através desta análise foram delimitadas quatro anomalias condutivas denominadas de “D”, “E”, “X” e “Y”.

As anomalias “D” e “E” correspondem às anomalias visualizadas no mapa de atenuação (Figura 5.1) e nas seções de GPR 3 e 4 (Figura 5.3). A anomalia “D” se estende entre as posições de 30m a 44m no perfil de caminhamento elétrico CE-01 (Figura 5.4). A anomalia “E” aparece no início da seção GPR 4 e entre as posições de 17m a 24m do perfil de caminhamento elétrico CE-01 (Figura 5.4), DE 20m à 24m do perfil de caminhamento elétrico CE-02 (Figura 5.5) e 26m à 44m do perfil de caminhamento elétrico CE-03 (Figura 5.6).

A anomalia “X” esta relacionada com as anomalias “A”, “B” e “C” visualizadas no mapa de atenuação de GPR (Figura 5.1) e nas seções GPR 1 e 2 (Figuras 5.2 e 5.3), sendo que, esta se estende para fora da área de mapeamento do GPR relacionando-se com as anomalias condutivas visualizadas entre as posições de 12 a 18m do perfil elétrico CE-03 (Figura 5.6) e entre as posições de 8 a 18m do perfil elétrico CE-05 (Figura 5.8).

Na anomalia “Y” vemos que esta se refere somente às anomalias condutivas visualizadas nos perfis de caminhamento elétrico CE-01, CE-02 e CE-04 (Figuras 5.4, 5.5 e 5.7 respectivamente), sendo que estas encontram-se nas posições iniciais do perfis CE-01 e CE-02 e entre as posições de 20m a 44m do CE-04.

As anomalias condutivas visualizadas no mapa de anomalias (Figura 5.9) podem indicar que estas regiões poderiam estar relacionadas com a presença de materiais biodegradados, conforme discutido no artigo de Sauck (1999). Entretanto, para comprovar esta hipótese seria necessário a execução de furos de

sondagens para a coleta de amostras de calhas, e em seguida, fazer análise bacteriológica em laboratório. Mas esta atividade não foi realizada por falta de recursos destinado à esta pesquisa.



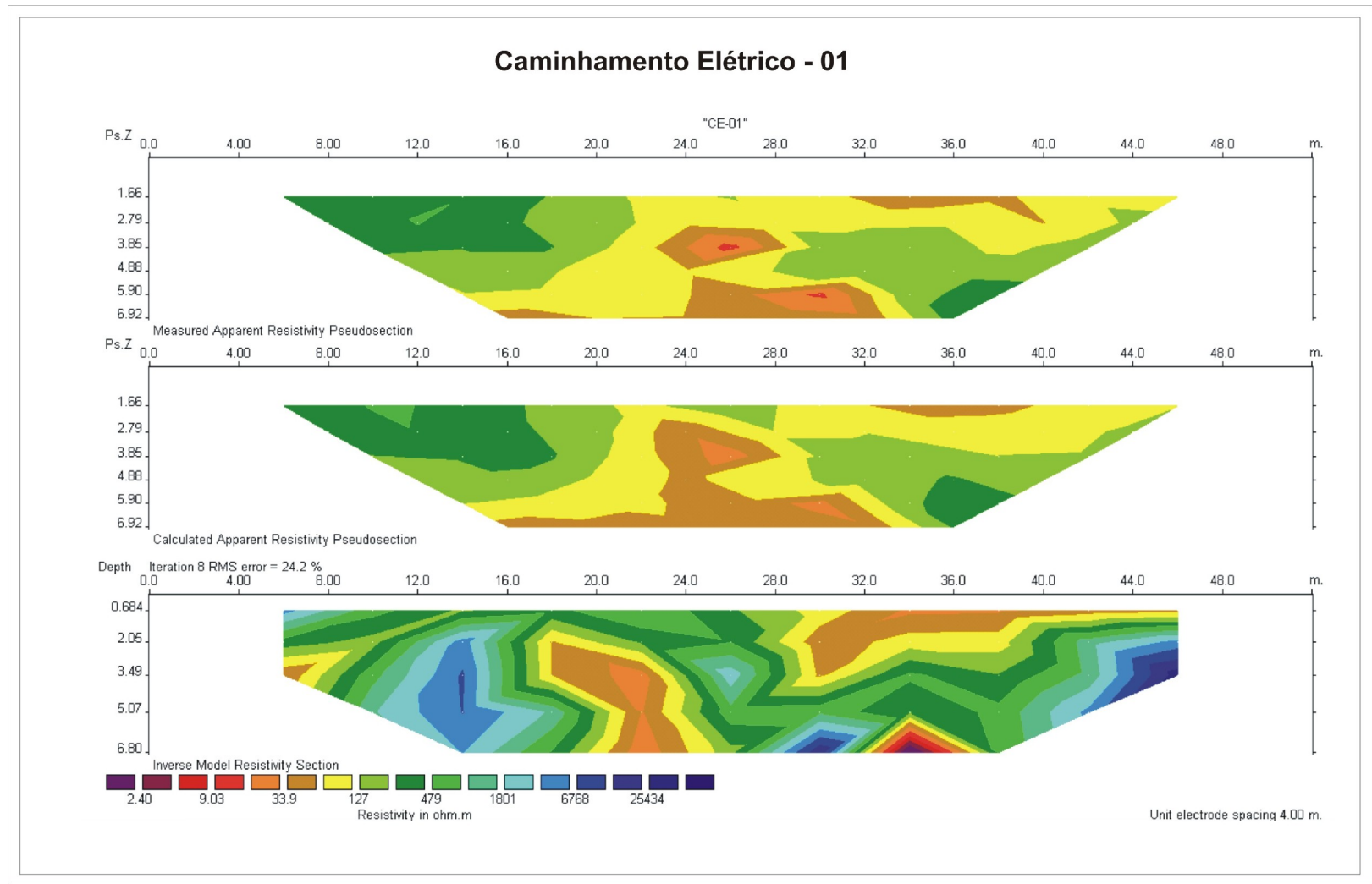


Figura 5.4: Caminhamento Elétrico – 01 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.

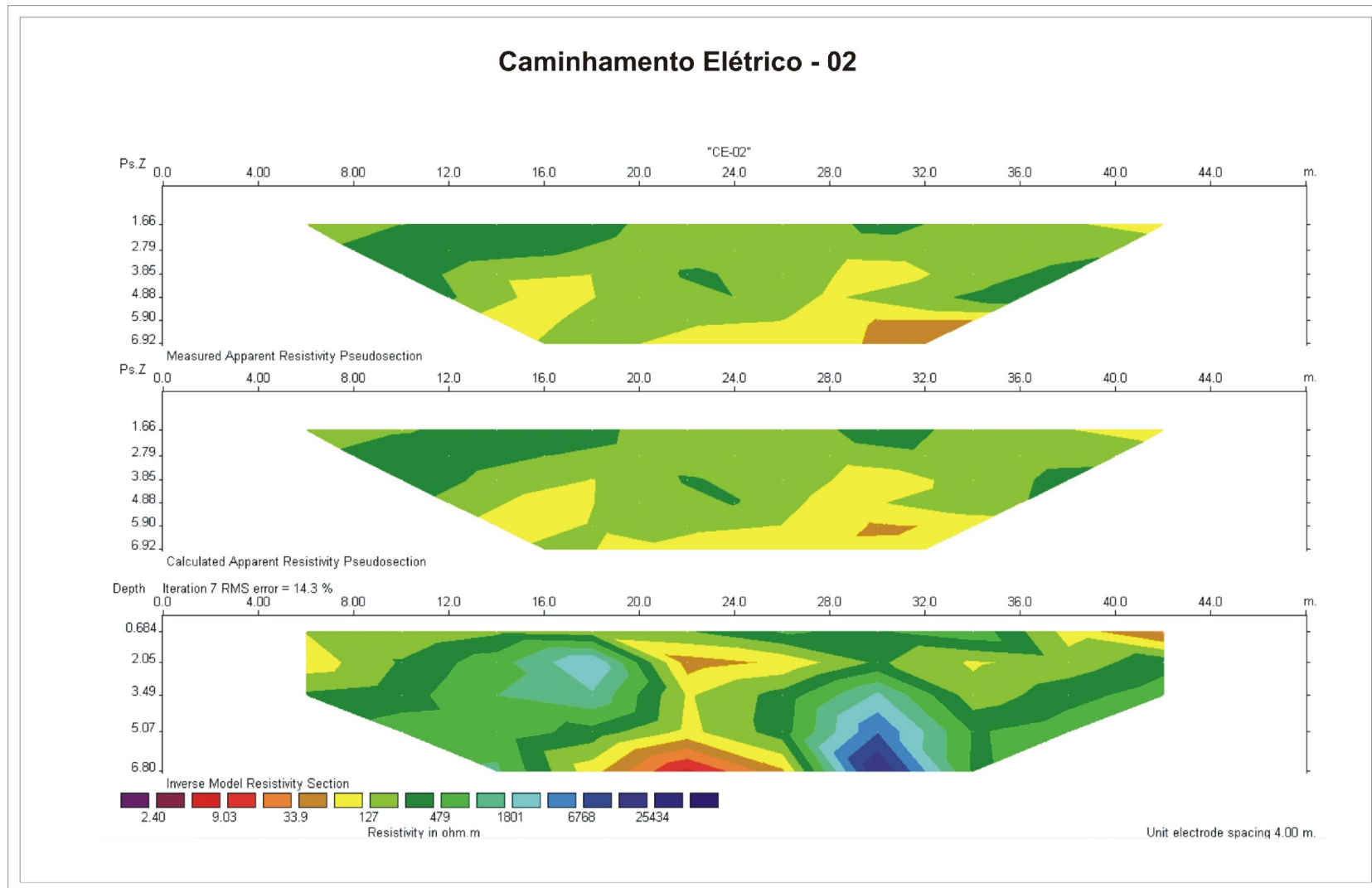


Figura 5.5: Caminhamento Elétrico – 02 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.

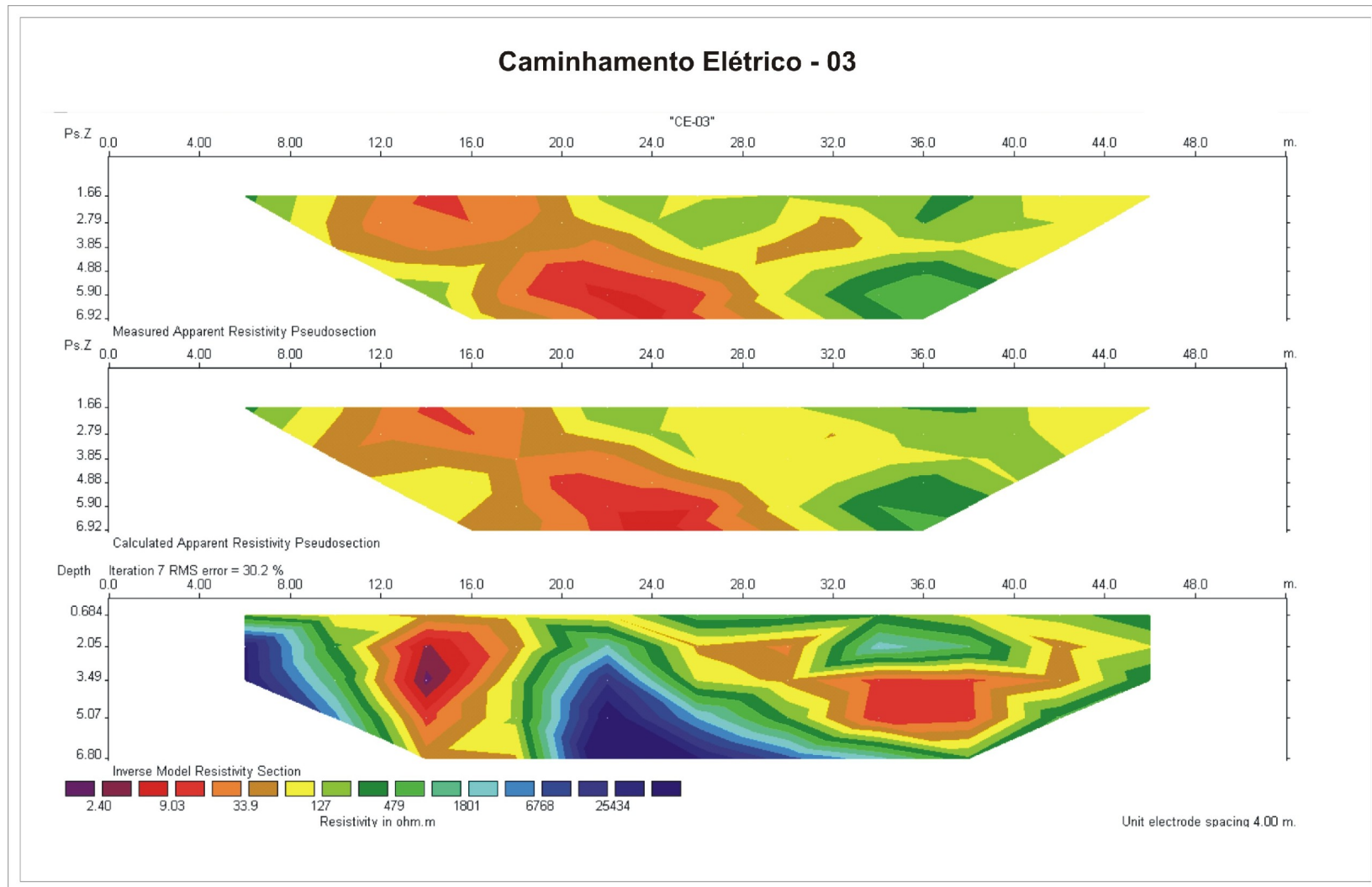


Figura 5.6: Caminhamento Elétrico – 03 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.

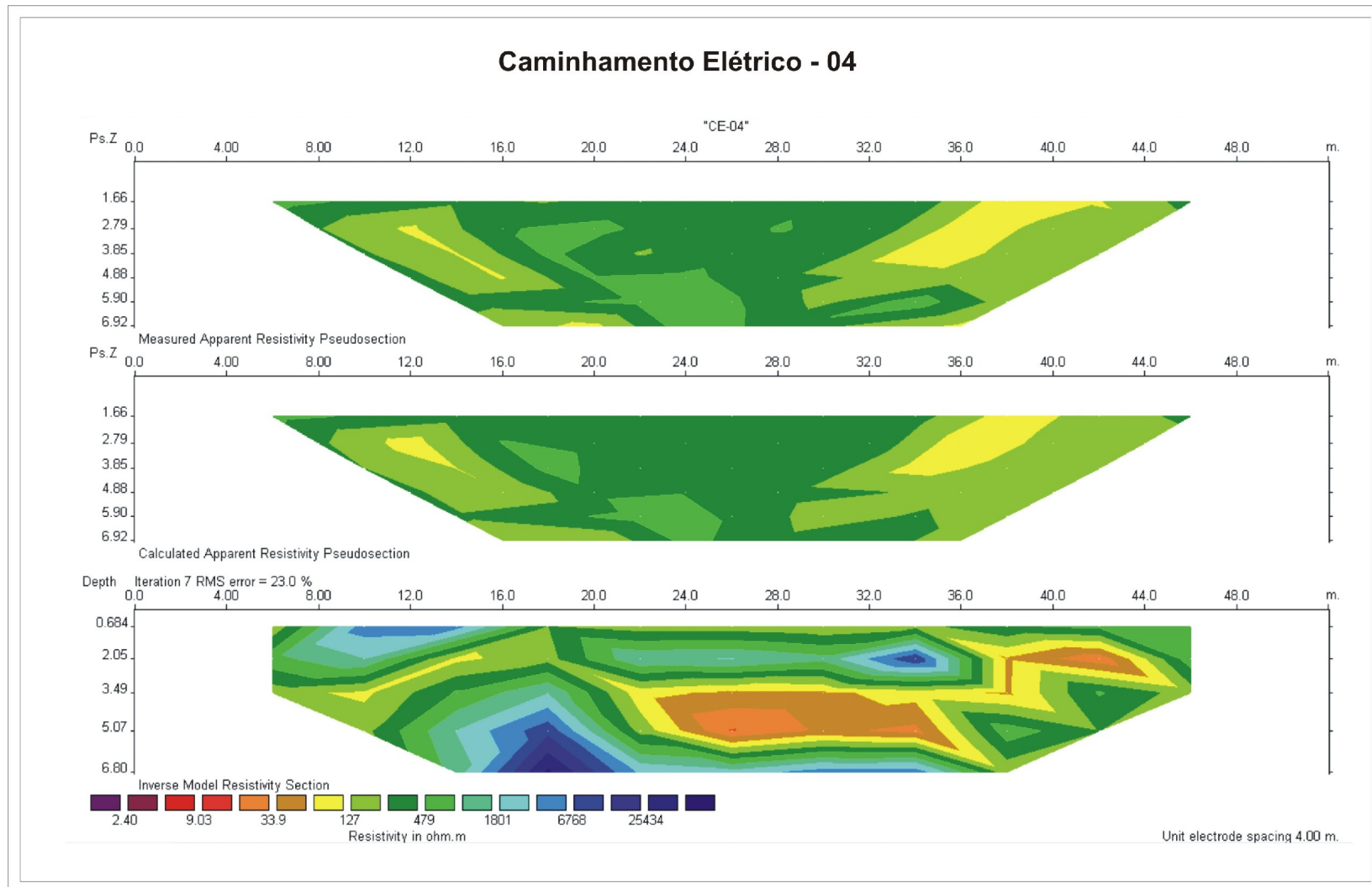


Figura 5.7: Caminhamento Elétrico – 04 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.

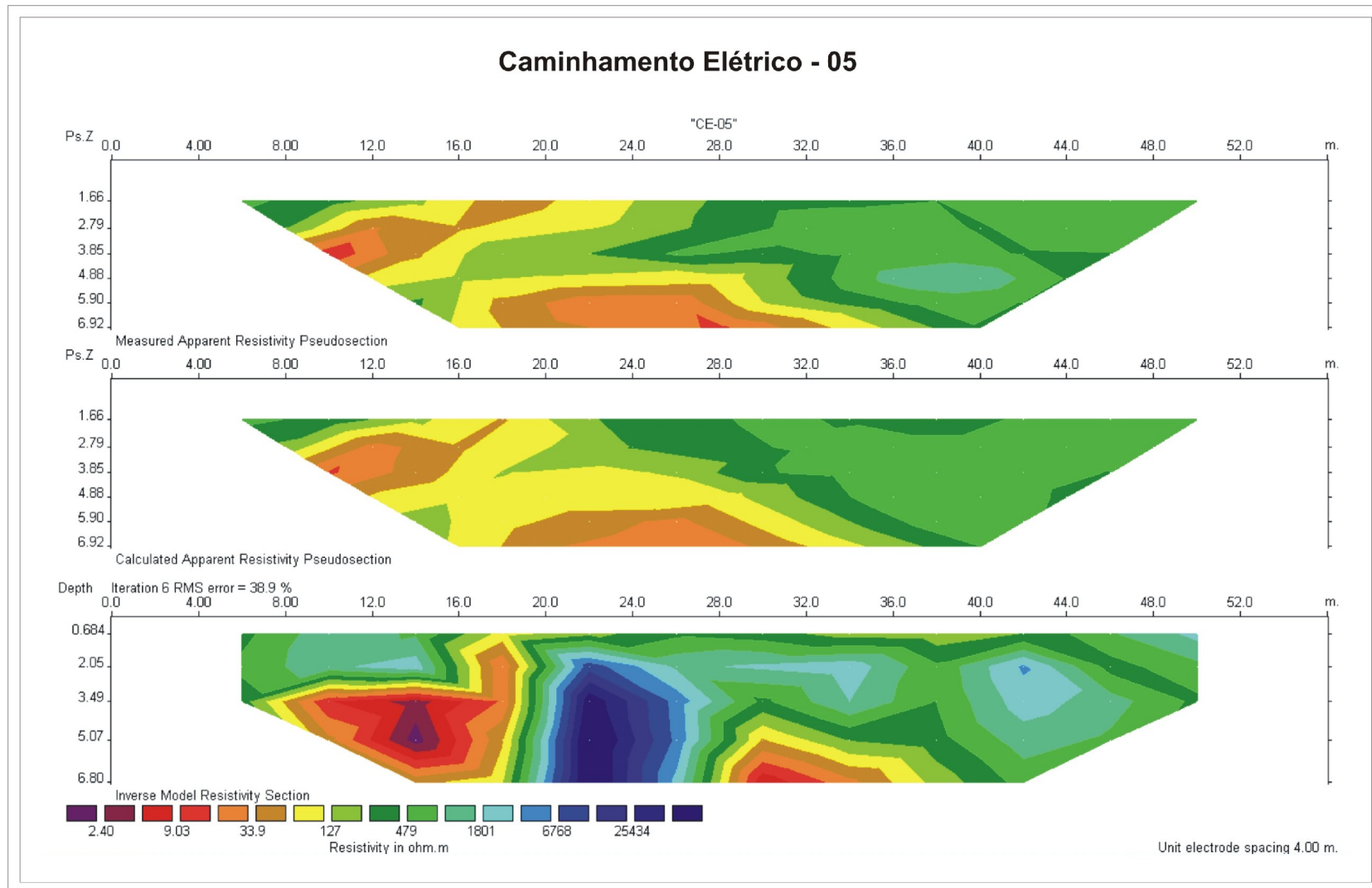


Figura 5.8: Caminhamento Elétrico – 05 da área “A” – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.

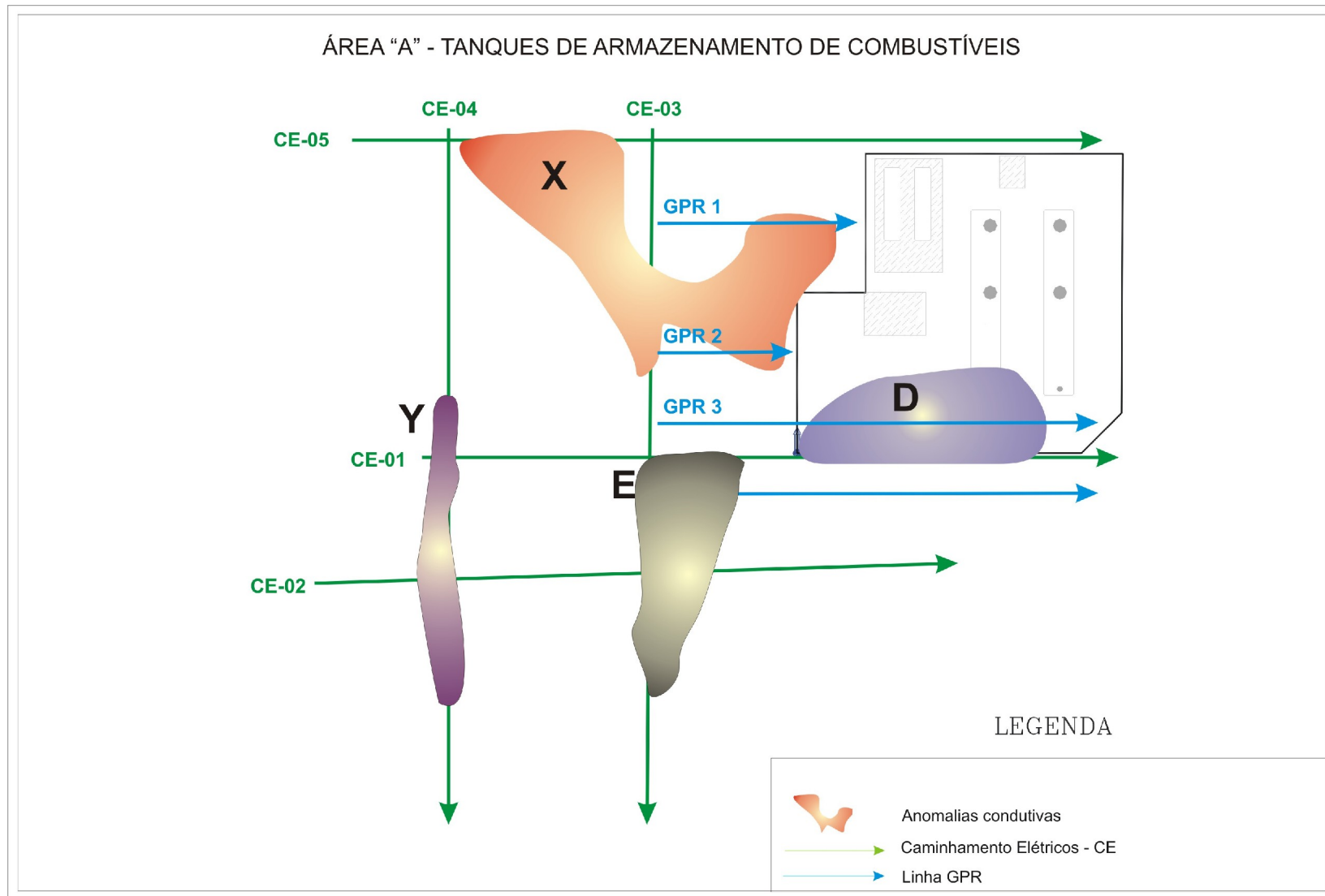


Figura 5.9: Mapa de anomalias da área "A" – Tanques de Armazenamento de Combustíveis.

Entretanto, foram realizadas medidas de compostos voláteis orgânicos (VOC). Para o estudo de VOC foram realizados 37 pontos de amostragem com medidas realizadas de concentração de VOC em ppm (partes por milhão) para as profundidades de 0,5m e 1,0m de profundidades. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram os mapas de concentração de vapores orgânicos (VOC) para as profundidades de 0,5m e 1,0m, e a Tabela 5.1 apresenta os valores percentuais de concentração de vapores orgânicos.

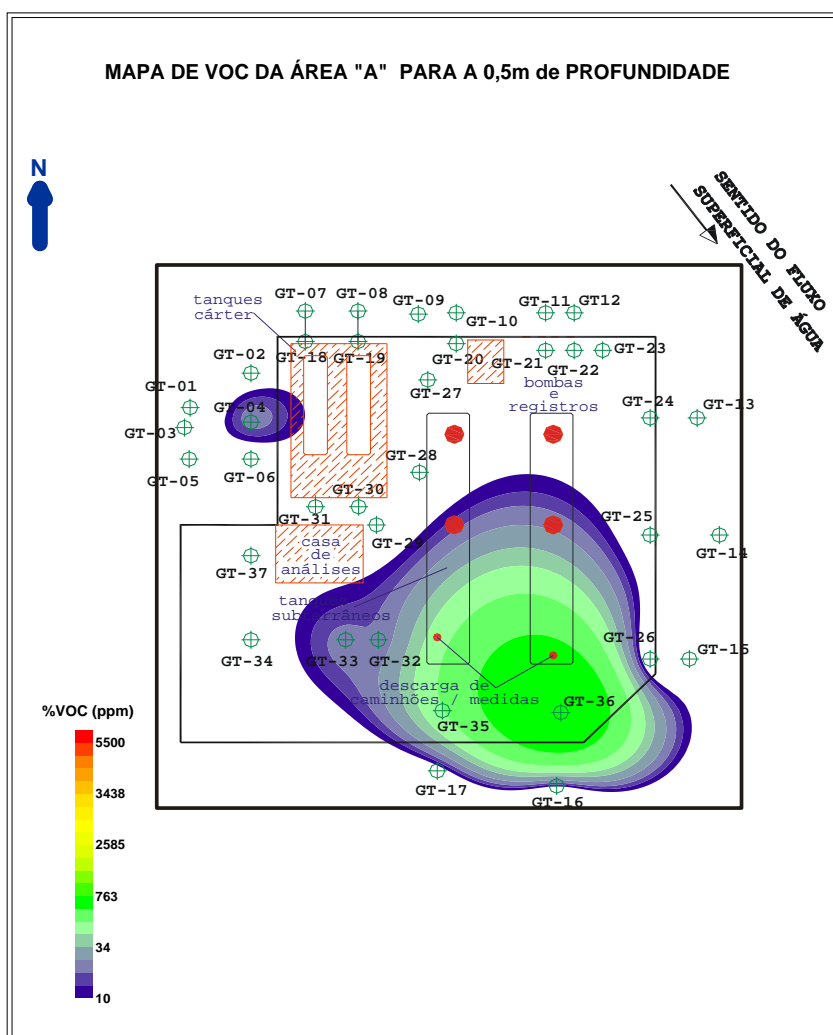


Figura 5.10: Mapa de VOC da área "A" – Tanque de Armazenamento de Combustíveis, para a profundidade de 0,5m.

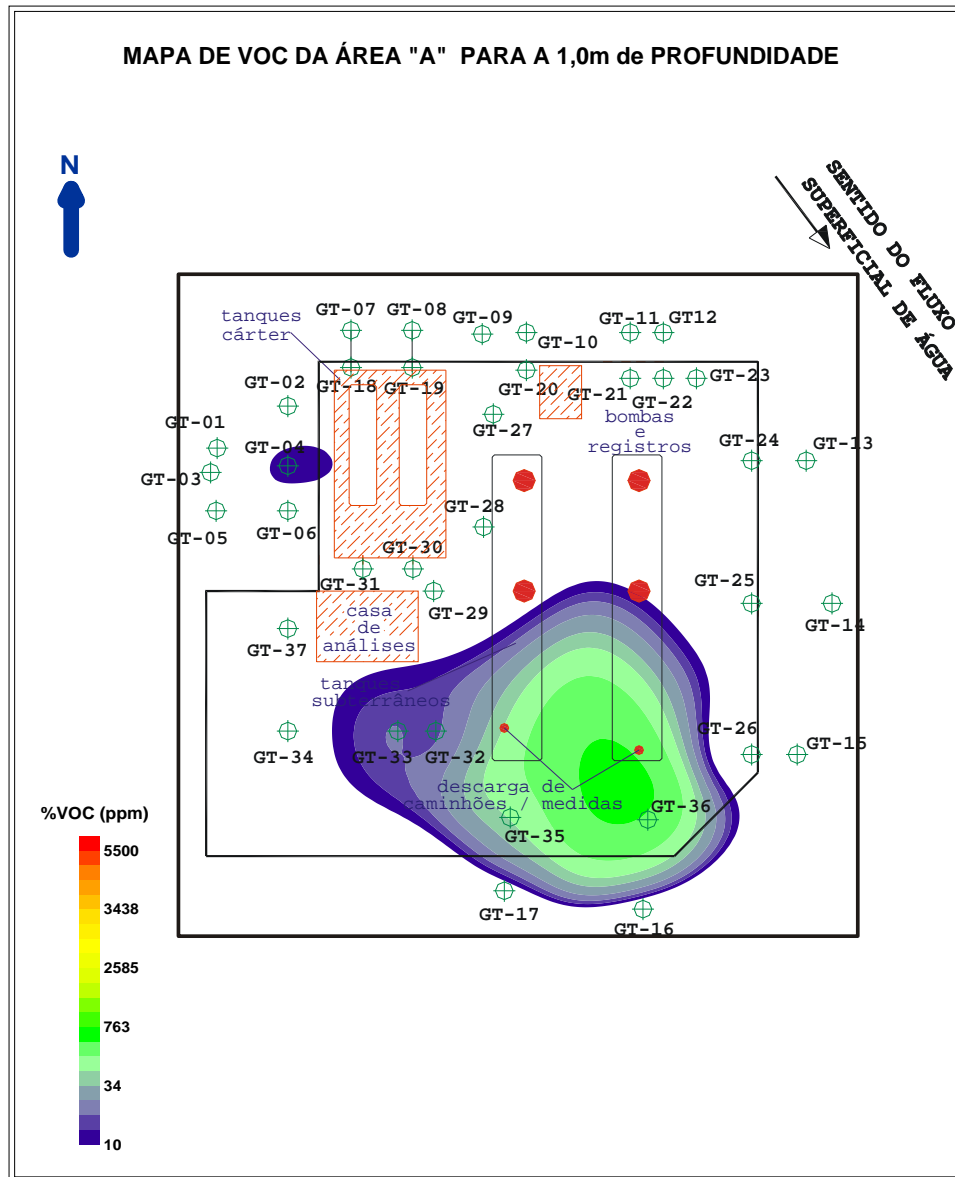


Figura 5.11: Mapa de VOC da área “A” – Tanque de Armazenamento de Combustíveis, para a profundidade de 1,0m.

A avaliação de gases no subsolo dentro da área A, indicou dois focos de maior concentração de VOC's com valores máximos de 180 ppm. O primeiro foco constituído pelos pontos GT-35 e GT-36, localizados nas bocas dos tanques subterrâneos e, o segundo foco, nos furos GT-31, G-32 e GT-04, próximo da casa de análises.



Do total dos pontos amostrados, 32 apresentaram valor zero na medida de concentração de VOC para as duas profundidades o que indica que não há a presença de contaminação proveniente de óleo diesel adsorvido no solo nestes pontos.

Segundo Silva (2002) dentre os processos de atenuação dos contaminante orgânicos, como os hidrocarbonetos de petróleo, as reações de óxido – redução biológicas ou biodegradação é a mais importante. A volatilização também apresenta importância significativa pois grande parte dos compostos constituintes da gasolina, óleo diesel e outros derivados de petróleo apresentam alta pressão de vapor à temperatura ambiente, perdendo-se para atmosfera e com o passar do tempo diminuindo a sua concentração.

Os 5 pontos amostrados (GT-04, GT-32, GT-33, GT-35 e GT-36) por apresentarem valores baixos de concentração de VOC indicam a possibilidade de haver produtos orgânicos derivados de petróleo que apresentam-se com estágios avançados no processo de biodegradação.

Comparando os resultados do levantamento geofísico com os resultados das concentrações de VOC verificamos que as anomalias condutivas “D” e “X” da Figura 5.9 correspondem à mesma posição com as anomalias visualizadas nas Figuras 5.10 e 5.11. Isto vem a mostrar que os resultados obtidos na investigação geofísica, onde temos fortes atenuações do sinal GPR denominados de “shadow zones” condizem com o observado por Sauck (1999) quando o mesmo verificou anomalias geofísicas de alta condutividade para hidrocarbonetos derivado de petróleo devido ao estágio de biodegradação do mesmo.

Para confirmar se está área esta ou não contaminada deveriam ter sido realizadas sondagens confirmatórias com análises geoquímicas e biológicas das anomalias observadas através dos estudos geofísicos e de concentração de VOC apresentados nesta dissertação.

Tabela 5.1: Ponto Amostrado, horário, temperatura, umidade e variações nos valores de concentração de vapores orgânicos (VOC'S).

Ponto Amostrado	Horário	Temp. (°C)	Umidade Max. (%)	Concentração VOC'S (ppm)	
				0,5 m	1,00 m
GT-01	11:27	26.0	78	0	0
GT-02	11:30	25.6	79	0	0
GT-03	11:33	26.1	78	0	0
GT-04	11:37	26.3	78	<b>20</b>	<b>12</b>
GT-05	11:40	26.0	79	0	0
GT-06	11:43	26.1	78	0	0
GT-07	11:45	27.1	79	0	0
GT-08	11:47	27.2	78	0	0
GT-09	11:50	27.0	78	0	0
GT-10	11:53	27.1	78	0	0
GT-11	11:55	27.5	79	0	0
GT-12	11:57	27.4	80	0	0
GT-13	12:00	27.5	79	0	0
GT-14	12:05	27.5	80	0	0
GT-15	12:07	27.5	80	0	0
GT-16	12:10	27.0	79	0	0
GT-17	12:15	27.0	79	0	0
GT-18	12:17	27.5	81	0	0
GT-19	12:18	27.5	81	0	0
GT-20	14:10	27.2	80	0	0
GT-21	14:07	27.2	79	0	0
GT-22	14:04	27.4	80	0	0
GT-23	14:00	27.1	80	0	0
GT-24	13:57	27.5	82	0	0
GT-25	13:55	27.4	79	0	0
GT-26	13:52	27.1	80	0	0
GT-27	14:12	27.5	78	0	0
GT-28	14:15	27.5	78	0	0
GT-29	14:18	27.7	78	0	0
GT-30	14:20	27.5	79	0	0
GT-31	14:25	27.5	79	0	0
GT-32	14:27	27.2	80	<b>20</b>	<b>16</b>
GT-33	14:29	27.5	79	<b>20</b>	<b>18</b>
GT-34	14:31	27.5	79	0	0
GT-35	13:46	26.1	78	<b>60</b>	<b>42</b>
GT-36	13:50	26.0	78	<b>180</b>	<b>100</b>
GT-37	14:35	27.0	80	0	0

## 5.2 Área “B” – Posto de Abastecimento de Locomotivas

De maneira análoga, para a área “B” também foi elaborado um mapa de atenuação do sinal GPR. A Figura 5.12 mostra a localização das seções GPR e de caminhamentos elétricos dipolares, bem como a atenuação do sinal do GPR em 0,5 e 1,0 m de profundidade.

Sobre este mapa, foram identificadas quatro regiões anômalas “AA”, “BB”, “CC” e “DD”, apresentando maior atenuação que podem estar ou não correlacionados com possíveis focos de contaminação por hidrocarbonetos. Importante destacar que em grande parte da área do mapa, ocorrem tubulações que passam por estas regiões anômalas, que são provenientes dos tanques de armazenagem de óleo diesel.

As seções de radar GPR – 01, 02 e 03 (Figuras 5.13 e 5.14) visam confirmar os pontos anômalos observados na Figura 5.12. A Figura 5.13 mostra a atenuação do sinal da onda eletromagnética denominados de “Shadow Zones – Zonas de Sombra” referentes às anomalias AA e BB observadas na Figura 5.12 para as frequências de 600MHz, 200MHz e 100MHz. Na Figura 5.14 nota-se com clareza duas zonas de sombra na seção GPR – 02 para as anomalias CC e DD, e na seção GPR – 03 é nítida a zona de sombra referente à anomalia AA no início deste perfil.

As Figura 5.15, 5.16 e 5.17 mostram as seções de caminhamento elétrico dipolo-dipolo (CE-06, CE-07 e CE-08 respectivamente) realizadas na área “B” - posto de abastecimento de locomotivas com os dados brutos, o modelo sintético

gerado para a realização do processo matemático de inversão dos dados e a seção geoeétrica obtida após a inversão 2D. Na Figura 5.16 a anomalia de elevada condutividade que ocorre entre as posições de 12m à 20m possui uma boa correlação com a anomalia CC observada no mapa de atenuação do sinal GPR (Figura 5.12) e com a zona de sombra observada na seção GPR – 02 (Figura 5.14).

Analisando em conjunto o Mapa de Atenuação de GPR (Figura 5.12) as seções de GPR das Figuras 5.13 e 5.14 e os Perfis de caminhamento elétrico (Figuras 5.15 à 5.17) foi possível delimitar em planta as anomalias condutivas mostradas na Figura 5.18. Através desta análise foram delimitadas 5 anomalias condutivas denominadas de “AA”, “BB”, “CC”, “DD” e “EE”.

As anomalias “AA” e “BB” da Figura 5.18 foram definidas através da integração da anomalias visualizada de mesmo nome no mapa de atenuação do sinal (Figura 5.12) com as anomalias caracterizadas pelas zonas de sombra apresentadas nas seções GPR 1 e 3 das Figuras 5.13 e 5.14.

Como o sentido do fluxo superficial de água mostrado na Figura 2.2 apresenta-se em direção oposta ao caminhamento elétrico CE-06 (Figura 5.15), isto poderia o não aparecimento das anomalias condutivas “AA” e “BB” visualizadas no sinal de GPR locadas próximo deste.

As anomalias “CC” e “DD” estão relacionada com as anomalias “de mesmo nome visualizadas no mapa de atenuação de GPR (Figura 5.12), nas seções GPR 2 (Figuras 5.13) e no perfil de caminhamento elétrico CE-07 (Figura, 5.16), sendo que, estas anomalias de atenuação do sinal visualizadas na seção de GPR 2

relacionam-se com as anomalias condutivas visualizadas entre as posições de 10 a 20m e 32m a 42m do perfil elétrico CE-07 (Figura 5.16). A anomalia “EE” foi definida através da anomalia condutiva visualizada no perfil de caminhamento elétrico CE-08 (Figura, 5.17) entre as posições de 28m à 44m, não tendo ela correlação com as anomalias do mapa de atenuação do sinal (Figura 5.12) e com seções de GPR por estar fora da área de mapeamento de GPR.

No estudo de VOC foram realizados 14 pontos de amostragem com medidas realizadas de concentração de VOC em ppm (partes por milhão) para as profundidades de 0,5m e 1,0m como mostra a Tabela 5.2. Do total dos pontos amostrados, 3 pontos (GA-01, GA-02 e GA-05) apresentaram valores abaixo de 1000ppm na medida de concentração de VOC para as duas profundidades, os outros 11 pontos amostrados (GA-03, GA-04, GA-06 a GA-11) apresentaram valores acima de 1000ppm de concentração de VOC o que pode caracterizar o local das medidas como sendo indicativo de área contaminada.

Comparando os mapas de VOC para as profundidades de 0,5m e 1,0m (Figuras 5.19 e 5.20, respectivamente), com o mapa de anomalias geofísicas delimitadas (Figura 5.18), com o mapa de atenuação do sinal eletromagnético (Figura 5.12) e com as anomalias relacionadas às zonas de sombra na seção GPR-02 (Figuras 5.14), e a anomalia condutiva do perfil de CE-07 (Figura 5.16) verifica-se que os resultados estão concordantes e mostram que os métodos geofísicos são ferramentas importantes em levantamentos de grandes áreas na localização e delineamento de possíveis plumas contaminantes.

Segundo Sauck (1999) locais com depósitos de derivados de hidrocarbonetos antigos podem apresentar fortes anomalias condutivas tanto para as seções de GPR quanto para as seções de resistividade elétrica, isto se deve ao fato da mesma poder estar em processo de biodegradação que acaba em seu processo produzindo sais tornando-a condutiva.

As anomalias geofísicas de GPR “AA e BB” (Figuras 5.12, 5.13 e 5.18) coincidiram com os pontos de amostragem onde os valores de concentração de VOC foram bastante elevados. Estes fatos sugerem que a área “B” está potencialmente contaminada, pois valores altos na concentração de voláteis indicam derrames recentes de derivados de hidrocarbonetos, provavelmente originados durante o processo de abastecimentos das locomotivas. Apesar disso, deve-se ter cuidado para definir se uma área está ou não contaminada. Para se ter uma confirmação se uma área está efetivamente contaminada deve-se fazer uma campanha de sondagens para realizar análises geoquímicas e bacteriológicas e com isso saber o nível de biodegradação do material encontrado.

As anomalias “CC” e “DD” visualizadas na seção de GPR 2 e no mapa de anomalias (Figura 5.14 e 5.18 respectivamente) e referentes aos altos valores de condutividade elétrica apresentadas no caminhamento elétrico CE-07 (Figura 5.16) e a anomalia “EE” mostrada na Figura 5.18 e no perfil de caminhamento elétrico CE-08 encontram-se fora da área onde foi realizado o levantamento de VOC, com isso, não foi possível verificar se estas anomalias estão ou não relacionadas a possíveis focos de contaminação.

Tabela 5.2: Pontos de Amostragem, horário, temperatura, umidade e variações nos valores de concentração de vapores orgânicos (VOC'S).

Pontos de amostragem	Horário	Temp. (°C)	Umidade max. (%)	Concentração VOC'S (ppm)	
				0,5 m	1,00 m
GA-01	14:45	26.5	78	180	120
GA-02	14:47	26.5	79	60	38
GA-03	14:50	26.2	80	1340	1200
GA-04	14:53	26.3	80	1000	800
GA-05	15:00	26.7	79	20	0
GA-06	15:03	27.0	80	5180	5000
GA-07	14:53	26.3	80	4000	3600
GA-08	15:30	26.3	80	1100	800
GA-09	14:55	26.4	79	5080	4600
GA-10	15:25	26.2	80	3700	3200
GA-11	14:57	26.8	80	4800	3800
GA-12	15:10	26.0	80	2100	2000
GA-13	15:05	26.0	80	5100	4600
GA-14	15:10	26.4	80	5200	4000

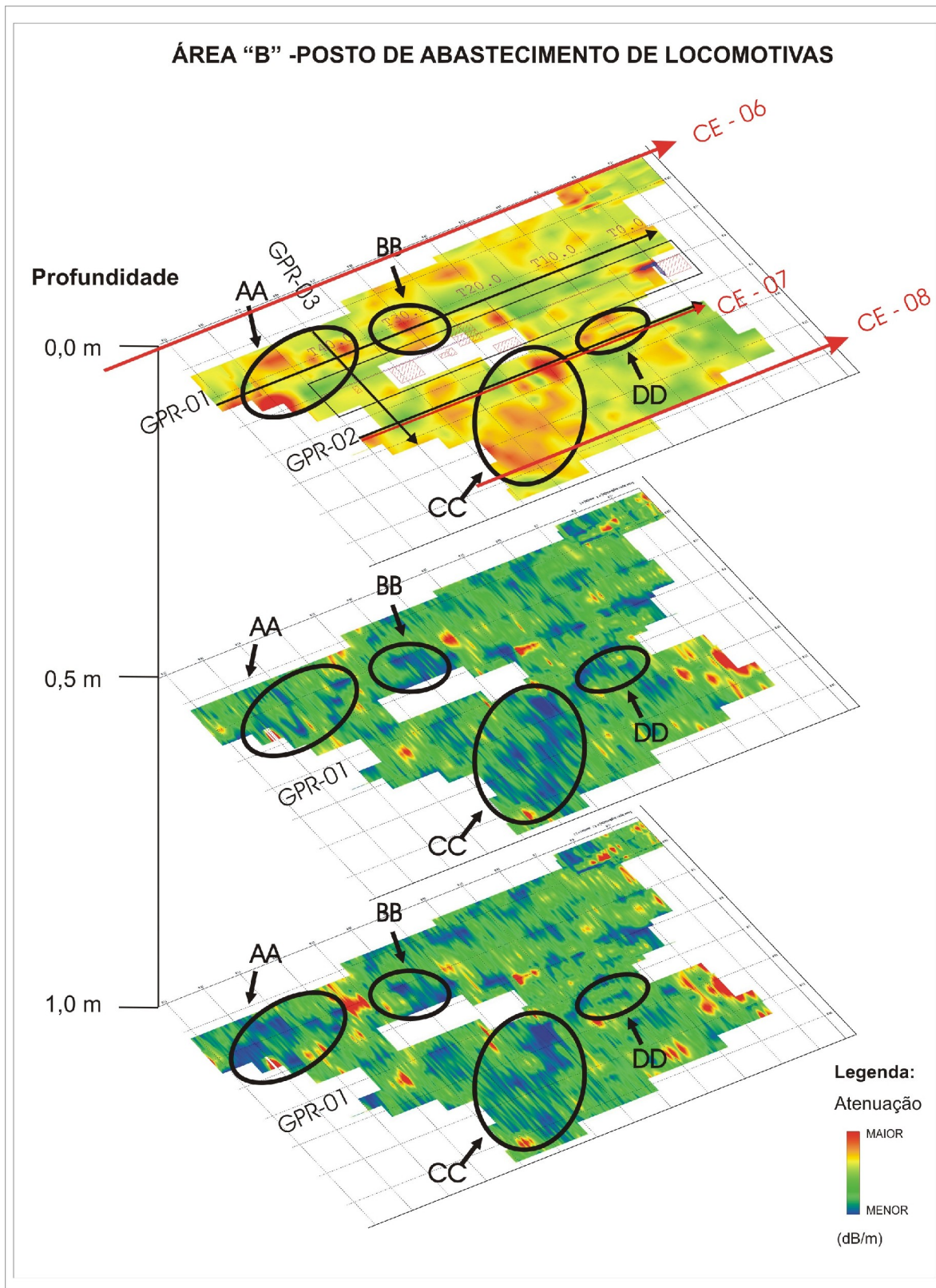


Figura 5.12: Mapa de Atenuação do sinal da área "B" – Posto de Abastecimento de Locomotivas.



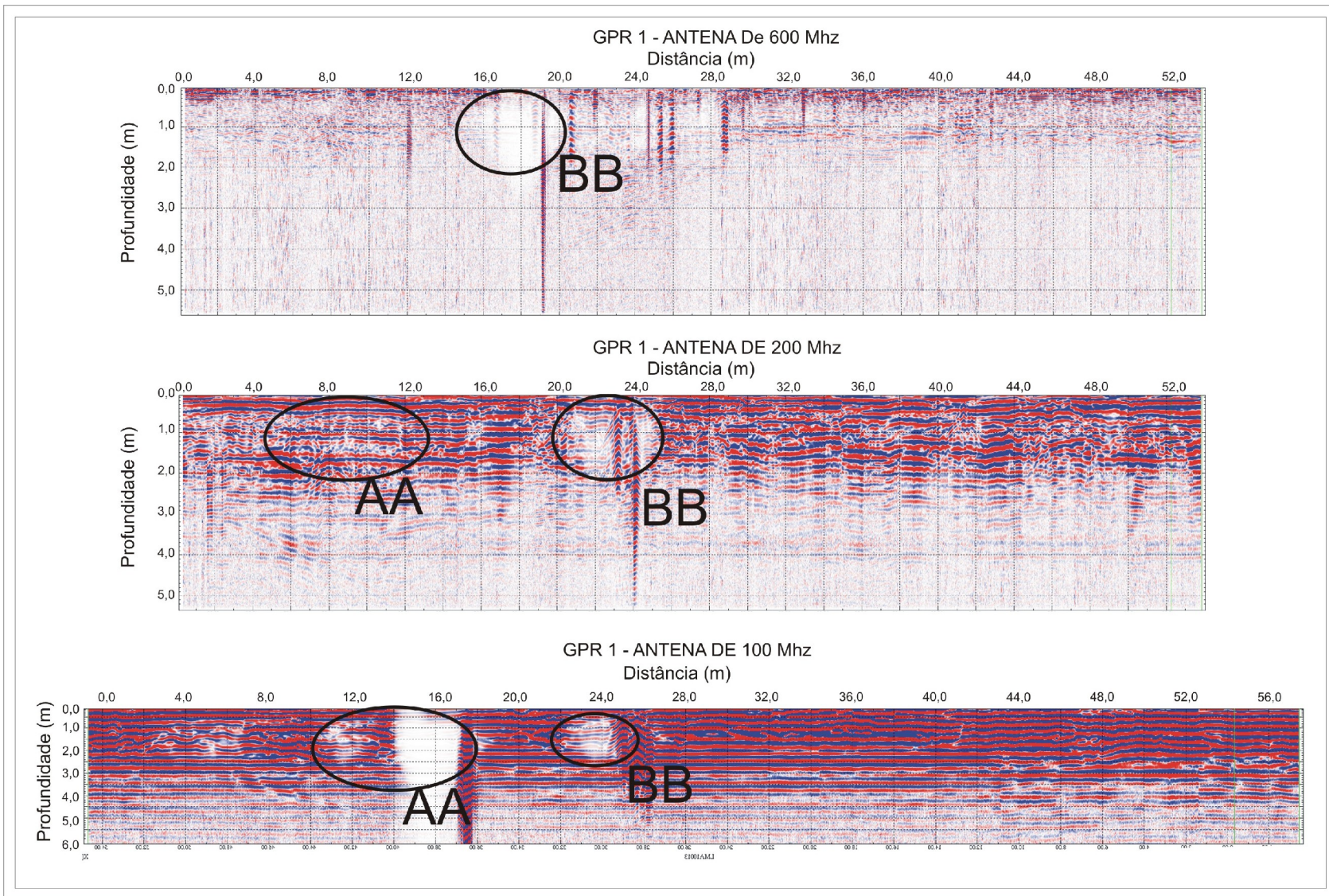


Figura 5.13: Seção GPR – 1 para as frequências de 600MHz, 200MHz e 100MHz da área “B” Posto de Abastecimento de Locomotivas.

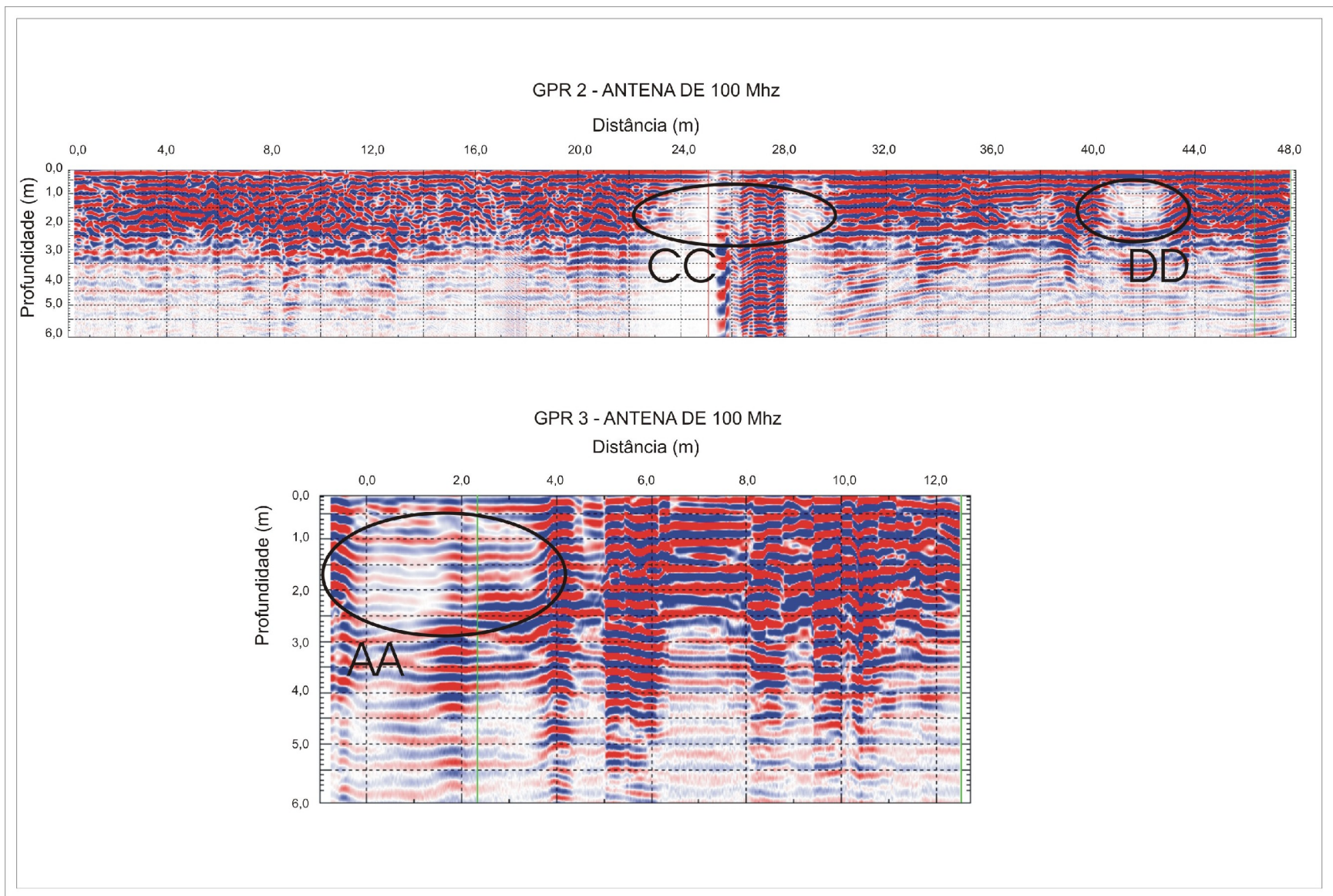


Figura 5.14: Seção GPR – 2 e 3 para as frequências de 100MHz da área “B” Posto de Abastecimento de Locomotivas.

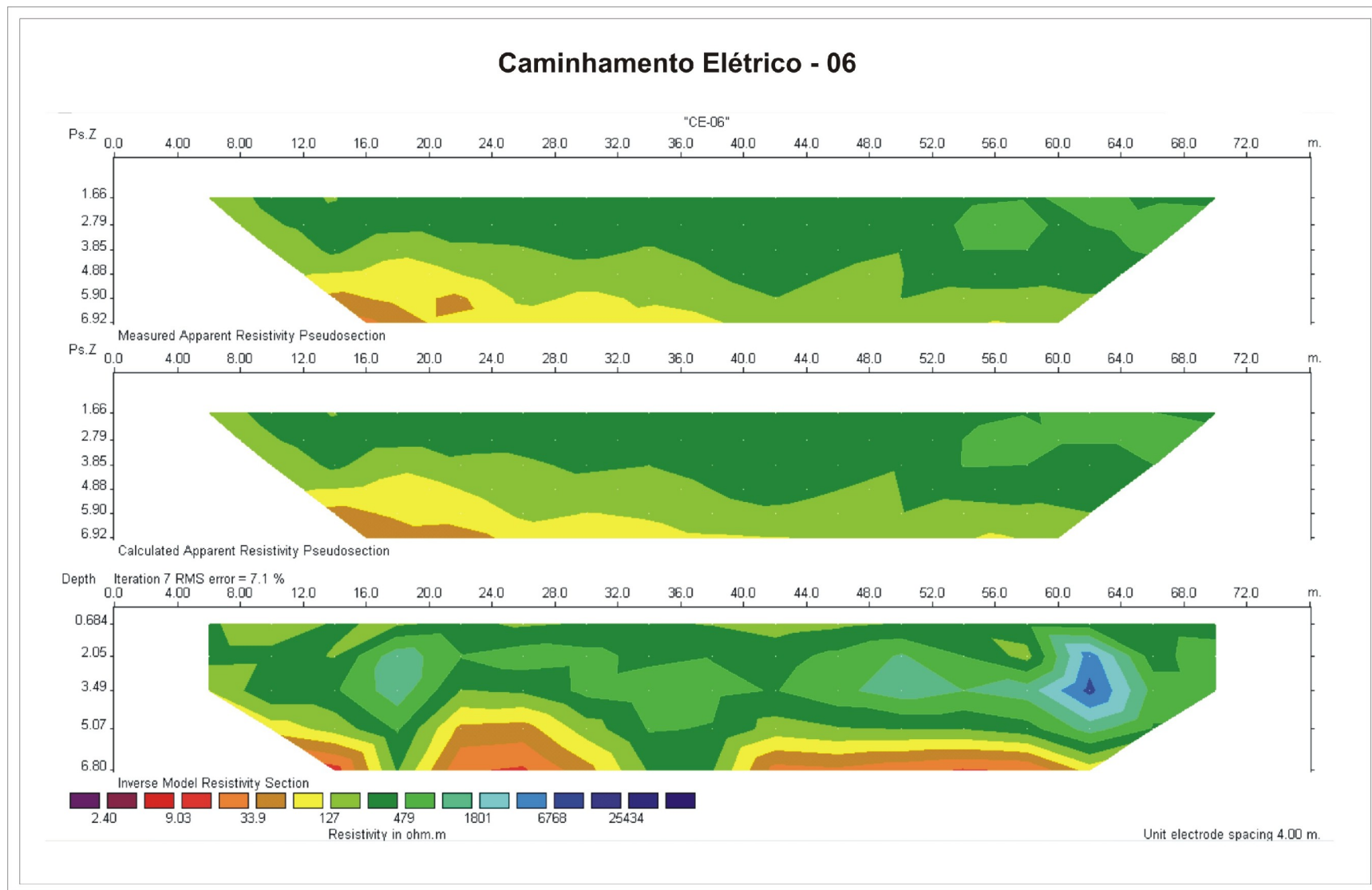


Figura 5.15: Caminhamento Elétrico 06 da área "B" Posto de Abastecimento de Locomotivas.

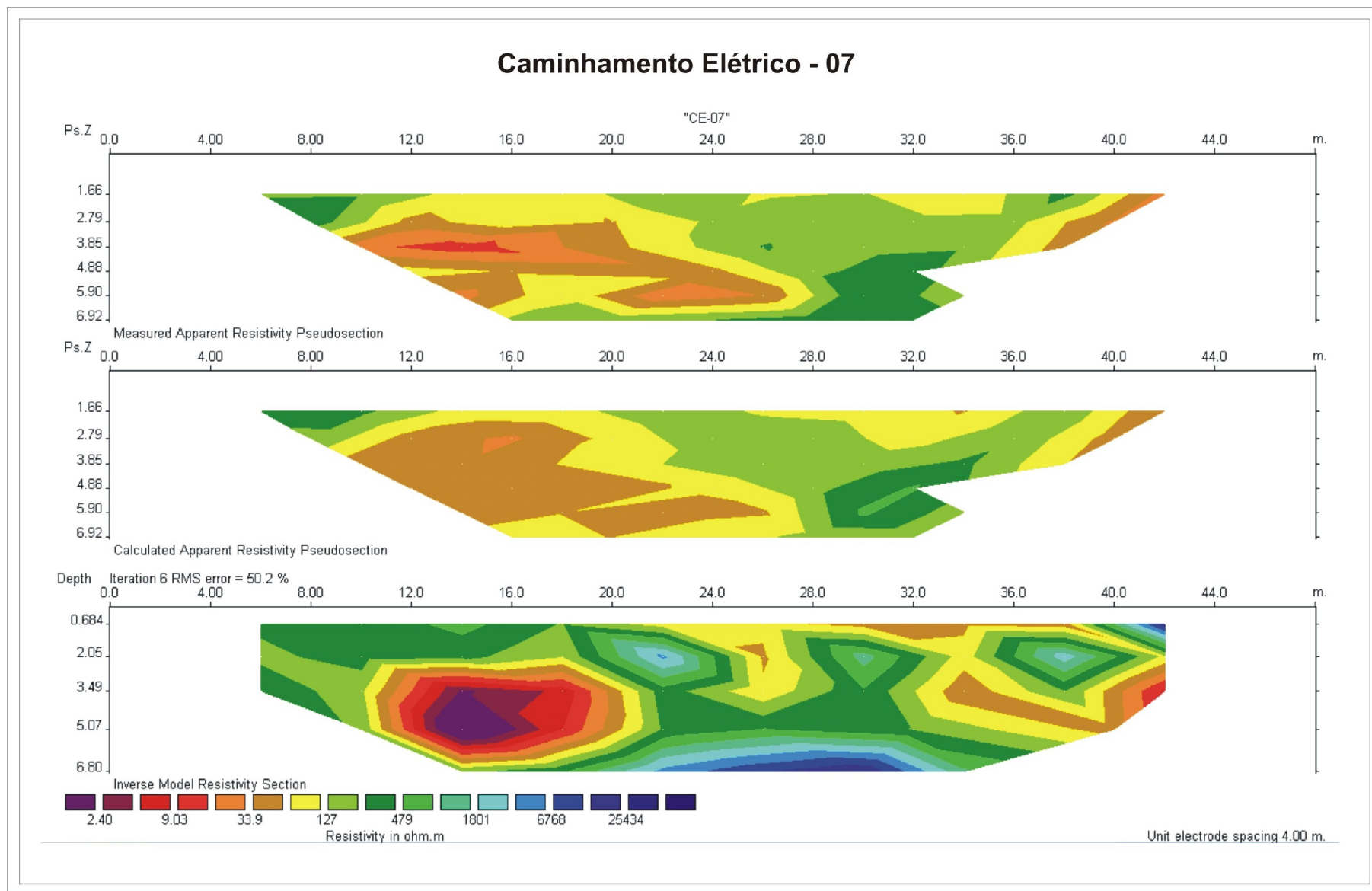


Figura 5.16: Caminhamento Elétrico 07 da área "B" Posto de Abastecimento de Locomotivas.

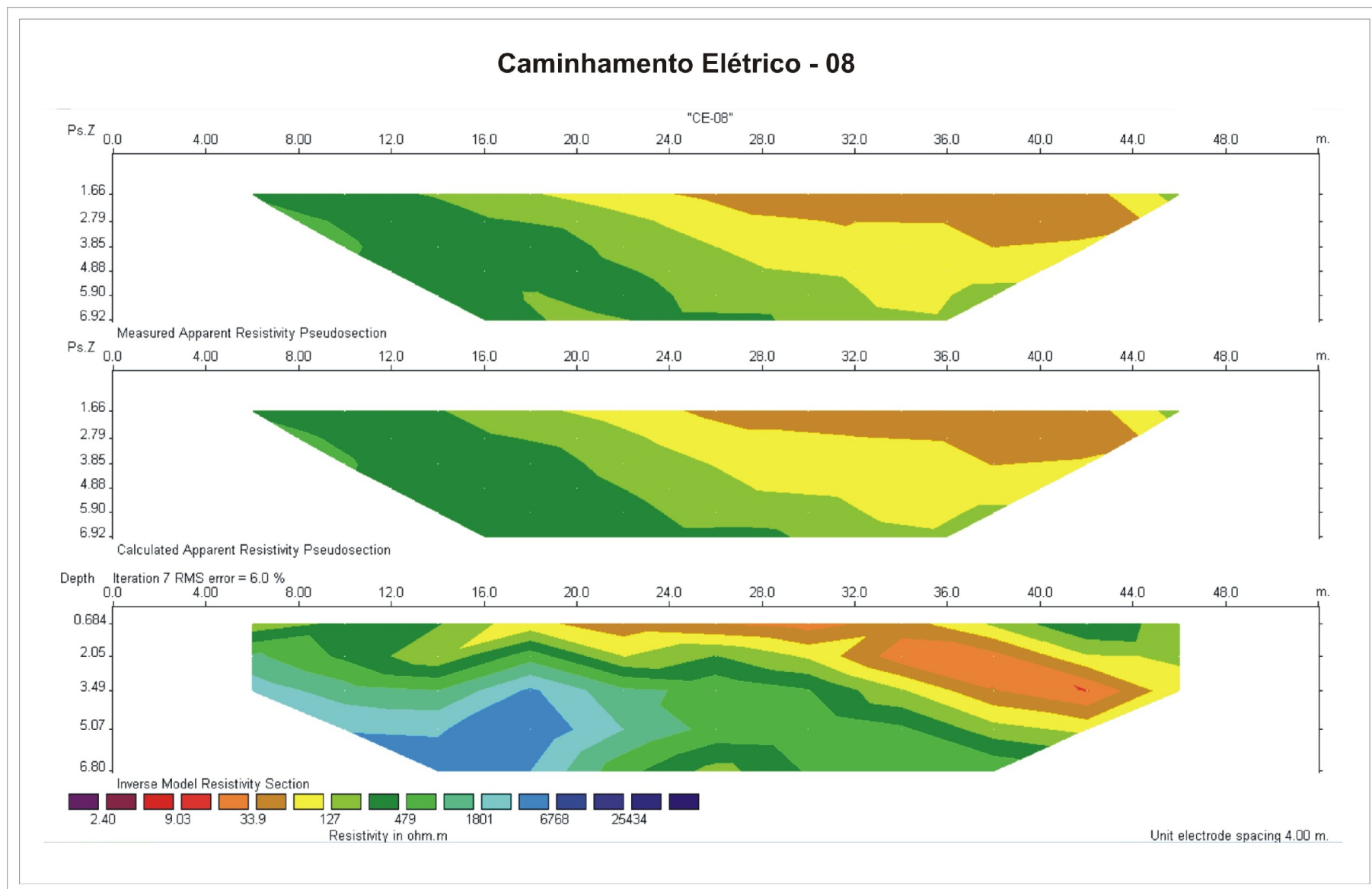
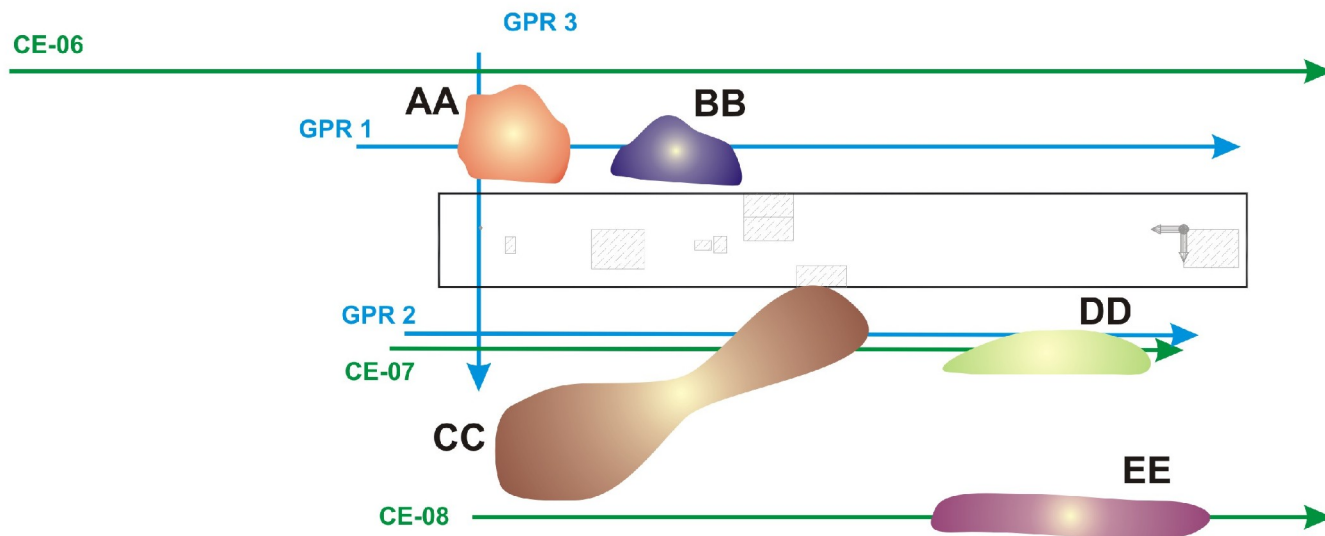


Figura 5.17: Caminhamento Elétrico 08 da área "B" Posto de Abastecimento de Locomotivas.

ÁREA "B" - POSTO DE ABASTECIMENTO DE LOCOMOTIVAS



LEGENDA

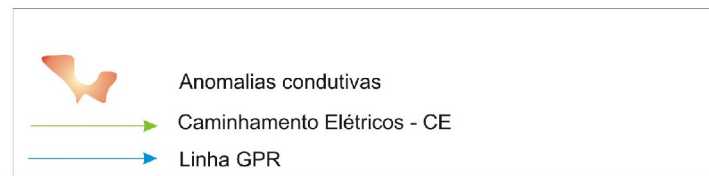


Figura 5.18: Mapa de anomalias da área "B" Posto de Abastecimento de Locomotivas

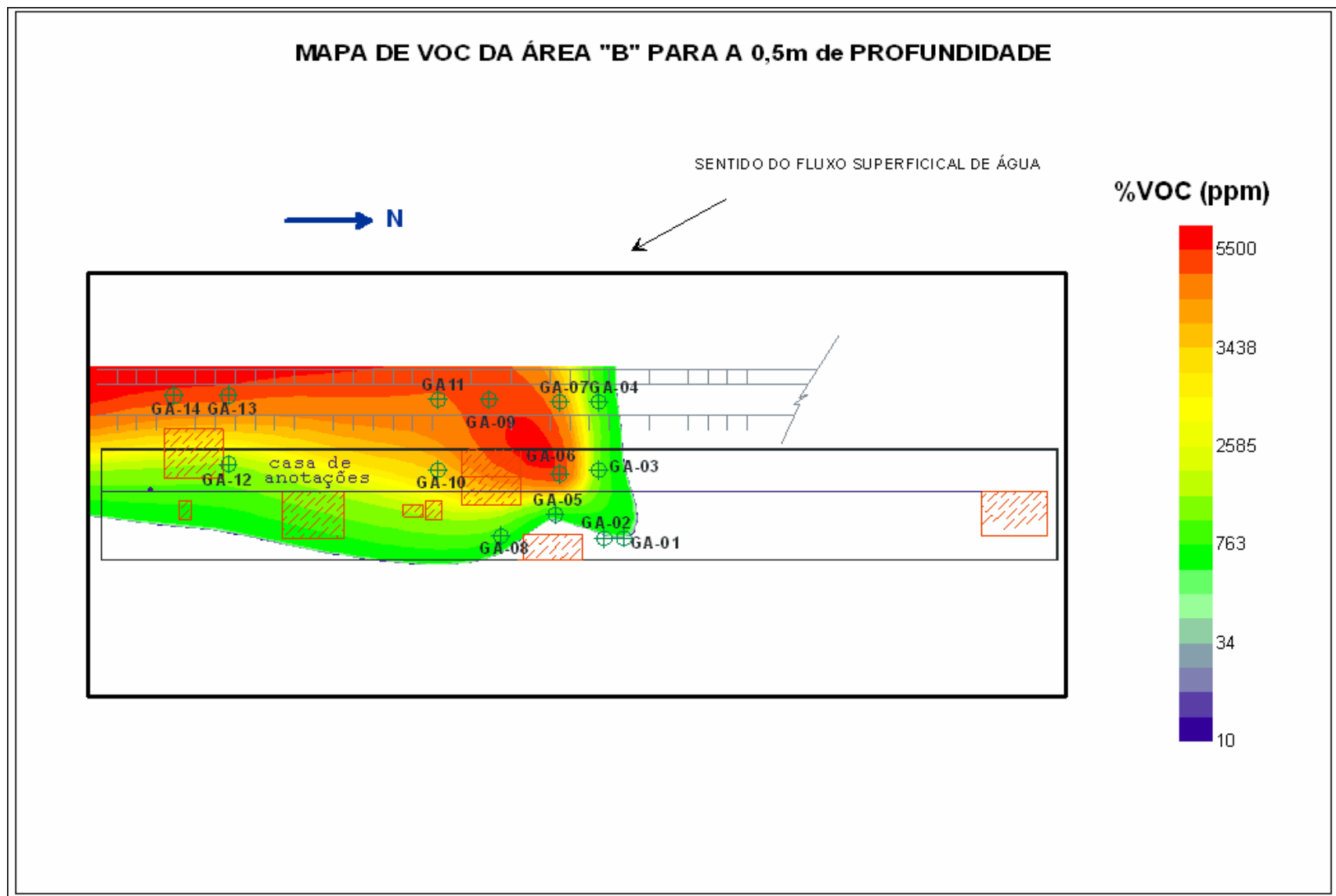


Figura 5.19: Mapa de VOC da área "B" para 0,5m de profundidade.

### MAPA DE VOC DA ÁREA "B" PARA A 1,0m de PROFUNDIDADE

SENTIDO DO FLUXO SUPERFICIAL DE ÁGUA

→ N

%VOC (ppm)

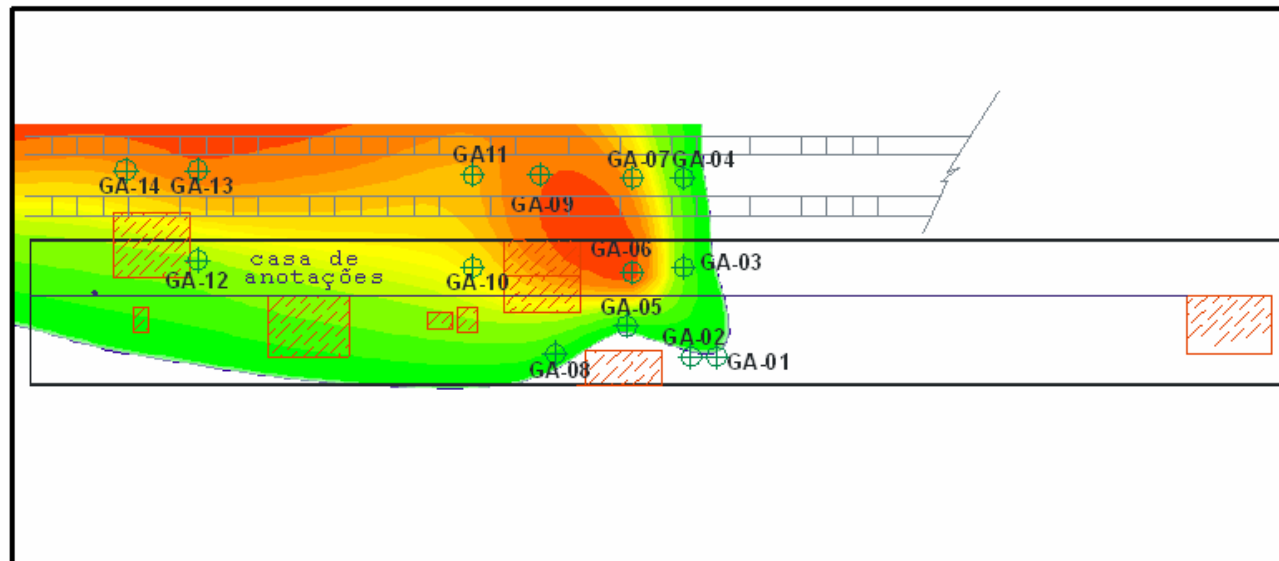


Figura 5.20: Mapa de VOC da área "B" para 1,0m de profundidade.



## 6 Conclusão

Os resultados de GPR e Eletrorresistividade das áreas “A” - tanques de armazenamento de combustíveis e área “B” – posto de abastecimento de locomotivas, apresentaram nítidas assinaturas geofísicas caracterizadas por regiões anômalas.

Nos perfis GPR, as regiões anômalas são caracterizadas pela ausência de reflexão do sinal, denominada de zona de sombra ou “*shadow zone*”. Essas regiões apresentaram boas correlações com as regiões de elevada condutividade observada nos perfis de caminhamentos elétricos.

As seções de caminhamento elétrico dipolar mostraram regiões anômalas de elevada condutividade. Segundo Sauck (1999), as anomalias condutivas podem estar relacionadas à ação da biodegradação do material contaminado por derivados de hidrocarbonetos (óleo diesel), ou pode ser devido a influência da própria geologia local, como por exemplo, devido a presença de camadas saturadas em água ou presença de camadas argilosas.

Sob as regiões de anomalias condutivas identificadas nas áreas “A” - tanques de armazenamento de combustíveis e área “B” - posto de abastecimento de locomotivas, foram realizadas sondagens para investigação do tipo VOC (Compostos Orgânicos Voláteis) para verificar a presença de voláteis nas anomalias apontadas pelos métodos geofísicos, visando confirmar a existência ou não de produto derivado de origem orgânica.

O resultados do VOC mostraram que a área “A” é uma área com ausência de contaminação por derivados de hidrocarbonetos, por apresentar valores nulos de concentração de VOC em ppm, em grande parte das amostras coletadas, exceto as amostras (GT-04, GT-32, GT-33, GT-35 e GT-36) que apresentaram valores muito baixos. Na área “B” os resultados da grande maioria das amostras apresentaram elevadas concentrações de VOC com valores acima de 1000ppm, indicando que esta é uma área com potencial de contaminação.

A integração dos resultados das sondagens do tipo VOC (compostos orgânicos voláteis) com os resultados dos levantamentos geofísicos (GPR e Eletroresistividade) foi fundamental para uma melhor caracterização geofísica e delineamento da pluma de contaminação nas áreas de estudo, mostrando assim a eficácia dos métodos geofísicos utilizados em estudos ambientais.

Para uma confirmação sobre a possível contaminação das áreas “A” e “B” recomenda-se a execução de furos de sondagens para a coleta de amostras de calha para análises química e biológica para a contagem de bactérias, das quais poderia se definir o grau de contaminação do subsolo e o estágio de biodegradação em que se encontra o material.

## Referências Bibliográficas

ANNAN, A. P. Ground penetration radar workshop notes. *Sensors & Software, Inc.*, Internal Report, p. 130, 1992.

ANNAN, A. P., 1993. Practical processing GPR data. *In: GOVERNMENT WORKSHOP ON GROUND PENETRATING RADAR, 2<sup>nd</sup>*, 1993, Columbus, ohio, Proceedings..., Columbus, 26p.

ANNAN, A. P., 1996. Transmission dispersion and GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, V.0, n.2, p.125-136.

ANNAN, A. P. & COSWAY, S.W., 1992. Ground penetration radar survey design. *In: SYNPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS*, 5ft, 1992, Oakbrook, Illinois. Proceedings..., Oakbrook, SAGEEP, v.2, p.329-352.

BORGES, W. R. & GOMES, M. J. S., 1999. Caracterização Geofísica do Morro Solteiro, Complexo Aurífero Lavrinha, Pontes e Lacerda – MT. Trabalho de Conclusão de curso em geologia, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, UFMT, Cuiabá – MT, 130p.

BRAGA, A. C de O, 1997. Métodos Geométricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP, Rio Claro, SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 169p.

BRAGA, A. C de O, 2003. Métodos Geométricos Aplicados. Apostila, Departamento de Geologia Aplicada do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista - UNESP, p.91.

BREWSTER, M. & ANNAN, A. P., 1994. Ground Penetrating Radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200MHz radar, Geophysics Vol. 59 N<sup>o</sup> 8, August 1994, p. 1211 – 1221.

CASTRO, D.L & BRANCO, R.M.G.C, 2002. 4D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history, journal of applied geophysics.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - (1999) Amostragem do Solo. Norma CETESB 6300. Projeto CETESB-GTZ. São Paulo. 44p.

CPRM, 2004. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, Sistema de Informações Geográficas SIG. CD-Room

CUTRIM, A. O. Hidrogeologia demanda e Consumo de Água em Rondonópolis-MT: Subsídios para o Desenvolvimento Urbano Sustentável.1999. Tese (Doutorado em Ecologia e Manejo dos Recursos Naturais) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá-MT.

CUTRIM, A. O.; SHIRAIWA, S. & NASCIMENTO, A., 2001. Contribuição da Sondagem Elétrica Vertical à hidrogeologia da Bacia do Paraná no município de Juscineira – MT. *In: 7<sup>th</sup> International Congresso f the Brazilian Geophysical Society, Salvador - BA. Resumos Expandidos...., SBGf, CD-Room, p-372-375.*

DANIELS, D.J., 1996. Surface Penetrating Radar. The Institution of Eletrical Engineers, London, United Kingdom, 300 p.

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

EDWARDS, L. S., 1977. A modified pseudo-section for resistivity and induced polarization, *Geophysics*, vol. 42(3), 1020-1036.

ELIS, V.R. - 1999 - Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 264 p. (inédita)

FISHER, S.C., STEWART, R.R., JOL, H.M., 1996. Ground penetrating radar (GPR) data enhancement using seismic techniques. *J. Environ. Eng. Geophys.* 1, 89–96.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F.; MALGUTTI, W. F.; PRADO, R. L. & DOURADO, J. C., 2001. Métodos e Técnicas Geométricas Rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano, *Revista Brasileira de Geofísica – SBGf*, Vol 19, Nº 1, p. 33 – 46.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1979. Levantamento aerofotogramétrico. Prancha SF-23-Y-A-V-4-NO-B. Folha Paulina. Escala 1:10.000.

IDSGRED, IDS Version 4.2, 2003. Manual de usuário do Software e equipamento. Pisa, Italy, p. 148.

KELLER, G.V. Rock and mineral properties. *Investigations in Geophysics*, n3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, v.1, p.13-51, 1987.

KNIGHT, R., 2001. Ground Penetrating Radar for Environmental Applications. *Annual Review Earth Planetary Science*, vol. 29, p. 229-255, 2001.

KRÜGER, M. M., 2002. Monitoramento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos “Exemplo de uma área urbana em Curitiba – Br”. Tese de Mestrado, Setor de Ciências da Terra, UFPR. 145p.

LOKE, M.H., 1998. RES2Dinv ver. 3.3. for Windows 3.1 and 95– Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software User’s Manual, Penang, Malaysia, 35p.

LOKE, M.H., 1999. Electrical Imaging Surveys for Environment and Engineering Studies: A practical guide to 2D and 3D surveys. Malaysia.

MACHADO, F. B., 2005. Geologia e Aspectos Petrológicos das Rochas Intrusivas e Efusivas Mesozóicas de Parte da Borda Leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista.

MILANI, E. J. 2004. Comentários Sobre a Origem e Evolução Tectônica da Bacia do Paraná. Livro Geologia do Continente Sul-Americano.

MOREY, R. M. Continuous subsurface profiling by impulse radar. In: Engineering Foundation Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction, Henniker. Proceedings..., Henniker: American Society of Civil Engineers, p.213-232, 1974.

OLHOEFT, G. R. *Electrical properties of rocks, in Physical Properties of Rocks and Minerals*, in Touloukian, Y. S., Judd, W. R., and Roy, R. F., eds.: New York, McGraw- Hill, p. 257-330, 1981.

OLHOEFT, G. R. Electrical, Magnetic, and Geometric Properties that determine Ground Penetrating Radar Performance. *IN: 6<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar*, Tohoku University, Sendai, Japan, CD-Room , 1996.

ORELLANA, E., 1972. *Prospeccion Geoelétrica en corriente continua*. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, 523p.

PARASNIS, D. S., 1970. *Princípios de Geofísica Aplicada*. Trad. E. Orellana (original – 1962), Madrid, Ed. Paraninfo, 208p.

PEDROSA, T. R. M. A. M.; CASTRO, D. L. & BRANCO, R. M. G. C., 2005. Caracterização de plumas contaminantes de hidrocarbonetos em postos de abastecimento em Fortaleza, usando o método Radar de Penetração de Solo (GPR). *Revista de Geologia*, Vol. 18, N<sup>o</sup> 2, p. 189-202.

PORSANI, J.L., 1999. *Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 145 p.



PORSANI, J.L.; MALAGUTTI FILHO, W.; ELIS, V.R.; FISSEHA, S.; DOURADO, J.C.; MOURA, H.P., 2004. The Use of GPR and VES in Delineating a Contamination Plume in a Landfill site: A Case Study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics* 55, 199-209.

REYNOLDS, J.M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 796 p.

SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A. and NASH, M.S., 1998a. High conductivities associated with LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 2, no. 3, p. 203-212.

SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A. and WERKEMA, D.D., 1998b. Investigations of geoelectrical at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of applied Geophysics*, vol. 44, p. 167-180.

SAUCK, W.A., 1999. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of applied Geophysics*, vol. 44, p. 151-165.

SHIRAIWA, S.; LISOVSKY, S. P.; ELIS, V. R.; PORSANI, J. L. & BORGES, W. R., 2001. Estudos Geofísicos Integrados no Lixão de Cuiabá, MT, Brasil – Resultados Preliminares. *In: 7<sup>th</sup> International Congresso f the Brazilian Geophysical Society, Salvador - BA. Resumos Expandidos....., SBGf, CD-Room.*

SHERIFF, R. E (1991). *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*: Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists.

SILVA, J. A. F., 2002, *Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo*. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. P. 160.

STERN, W., 1929, *Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis*: Ger. Beitr. zur Geophysik, v.23, p. 292-333.

STRATTON, J. A. *Electromagnetic Theory*. McGraw Hill, p. 558-561, 1941.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E., 1990. *Applied Geophysics*. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.

ULRIKSEN, C. P. F., 1982. *Application of impulse radar to civil engineering*. Doctoral Thesis – Lund University of Technology, 179p.

VAN DAM, R. L., 2001. *Causes of Ground Penetrating Radar reflections in sediment*. Unpubl. Phd Thesis, University Amsterdam.

WARD, S., & G. HOHMANN, 1987, Electromagnetic theory for geophysical applications, *in* M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics: Investigations in Geophysics* 3, 131–308.

WERKEMA, Jr., D.D.; ATEKWANA, E.; SAUCK, E.; ROSSBACH, S. and DURIS, J., 2000. Vertical distribution of microbial abundances and apparent resistivity at LNAPL spill site. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGGEP' 2000)*, vol. 2, p. 597-608.

WHITELEY, R., 1995. *Environmental Geophysics: Challenges and Perspectives*. *Exploration Geophysics*. 25: 189 - 196.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)