

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

METODOLOGIA GEOFÍSICA PARA CONTAMINAÇÃO POR
HIDROCARBONETOS – ESTUDO DE CASO EM POSTO DE
COMBUSTÍVEIS.

Silvia Guimarães Marques

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos
Minerais e Hidrogeologia.

SÃO PAULO

2007

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Marques, Silvia Guimarães

Metodologia geofísica para contaminação por hidrocarbonetos - estudo de caso em posto de combustíveis / Silvia Guimarães Marques. - São Paulo, 2007.

98 f. : il.

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP

Orient.: Gallas, José Domingos Faraco

1. Hidrocarbonetos : Contaminação 2. Métodos geofísicos 3. Posto de combustíveis I. Título

À minha queridíssima filha Gabriela,
para que também consiga realizar
cada um de seus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Os maiores agradecimentos ao meu orientador, Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas, por ter acreditado em mim desde o princípio, pela boa vontade, bom humor, generosidade e presença constante na orientação e elaboração desta dissertação.

Ao MSc. Otávio C.B. Gandolfo pelos ensinamentos em GPR e apoio no campo dos ensaios de GPR e EM.

Aos colegas Patrícia Iezzi e Rodrigo Sato por me ajudarem a entender o difícil e fascinante mundo da Geologia.

Ao Paulo R. de Lima – CEPAS pelo auxílio nos trabalhos de campo.

À CETESB de Campinas que disponibilizou os dados químicos do P.Gigio.

À UNESP, particularmente aos Prof. Dr. João Carlos Dourado e Prof. Dr. Walter Malagutti Filho, pelo empréstimo do GPR.

À FAPESP pelo apoio financeiro na fase de campo deste trabalho (processo FAPESP 04/01239-8).

Ao Curso de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo por toda infra-estrutura colocada à disposição desta dissertação.

À Equipamentos Londrina que tanto me ensinou sobre postos de combustíveis, me deu inspiração e viabilizou este projeto tão precioso para mim.

Ao meu querido Efraim Rodrigues pela paciência infinita, apoio nas questões de forma, de informática e pelas valiosas sugestões para elaboração deste trabalho.

Aos meus pais Vicente e Vera por terem me ensinado valores como persistência e dedicação. E na idade adulta, por meu pai ressaltar a importância do trabalho e da responsabilidade e minha mãe, por sua maneira deliciosa de temperar a vida com malícia e irreverência.

SUMÁRIO

Dedicatória	
Agradecimentos	
Lista de figuras e fotos	
Lista de tabelas	
Lista de abreviaturas e siglas	
Lista de nomenclaturas	
Resumo	
Abstract	
1. Introdução	1
2. Objetivos	2
3. Revisão da literatura	3
3.1 Características dos hidrocarbonetos	3
3.2 Fases dos hidrocarbonetos e características da pluma.....	5
3.3 Geofísica na detecção dos hidrocarbonetos	11
4. Descrição da área e histórico da contaminação	21
5. Geologia e hidrogeologia da área	27
6. Materiais e métodos	31
6.1 O método da eletrorresistividade	31
6.1.1 Arranjos de eletrodos	33
6.1.2 Arranjo dipolo-dipolo	33
6.2 O método de polarização induzida – IP	36
6.2.1 O IP no domínio do tempo	37
6.2.2 Polarização metálica ou eletrônica	39
6.2.3 Polarização de membrana, não metálica ou eletrolítica.	40
6.2.4 Aquisição de campo	41
6.3 O método georradar – GPR	43

6.4 O método eletromagnético – EM	49
7 Resultados e discussão	54
7.1 Eletrorresistividade e polarização induzida - IP	54
7.2 Eletromagnético – EM 34.....	65
7.3 Georradar – GPR	71
7.4 Análises químicas dos poços de 2001 e 2005	74
8 Conclusão	80
Anexos.....	82
Referências bibliográficas	91

LISTA DE FIGURAS E FOTOS

Figura 1 -	Comportamento de LNAPL na água subterrânea6
Figura 2 -	Modelo de definição de áreas em um vazamento de LNAPL11
Figura 3 -	Plano de avaliação de locais contaminados13
Figura 4 -	Gráfico de chuva acumulada de Atibaia de 2002 a 200521
Figura 5 -	Fotografia aérea do Posto Gigio (Atibaia –SP) com as linhas de investigação25
Figura 6 -	Croqui e localização da área com poços de monitoramento (PM), poços cacimba (PA) e linhas de investigação.....26
Figura 7 -	Mapa esquemático da geologia de Atibaia29
Figura 8 -	Mapa potenciométrico da área30
Figura 9 -	Princípio do método da eletrorresistividade.....31
Figura 10a -	Arranjo dipolo – dipolo (a)34
Figura 10b -	Arranjo dipolo – dipolo (b)34
Figura 11 -	Esquema de arranjo dipolo – dipolo35
Figura 12 -	Curva de descarga IP38
Figura 13 -	Curva de descarga IP em função do tempo38
Figura 14 -	Esquema de funcionamento do GPR46
Figura 15 -	Modos de operação do GPR47
Figura 16 -	Esquema de indução eletromagnética50
Figura 17 -	Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha 1.....56

Figura 18 -	Pseudo-seção de cargabilidade aparente e seção modelada de cargabilidade da Linha 157
Figura 19 -	Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha 258
Figura 20 -	Pseudo-seção de cargabilidade aparente e seção modelada de cargabilidade da Linha 259
Figura 21 -	Mapa de resistividade aparente e resistividade modelada do nível 2 do dipolo-dipolo61
Figura 22 -	Mapa de cargabilidade aparente e cargabilidade modelada do nível 2 do dipolo-dipolo62
Figura 23 -	Mapa de resistividade aparente e resistividade modelada do nível 3 do dipolo-dipolo63
Figura 24 -	Mapa de cargabilidade aparente e cargabilidade modelada do nível 3 do dipolo-dipolo64
Figura 25 -	Perfil EM da Linha 1 - canteiro central Rod. Fernão Dias - campo horizontal e vertical67
Figura 26 -	Perfil EM da Linha 2 - estrada do povoado - campo horizontal e vertical68
Figura 27 -	Mapa condutividade campo vertical – dados brutos e filtrados69
Figura 28 -	Mapa condutividade campo horizontal – dados brutos e filtrados70
Figura 29 -	Perfil GPR da Linha 1 canteiro central da Rod. Fernão Dias72
Figura 30 -	Perfil GPR da Linha 2 rua do povoado73
Figura 31 -	Mapa de contaminação por análise multivariada:

	dados químicos dos poços em 2001.....	76
Figura 32 -	Mapa de contaminação por análise multivariada: dados químicos dos poços em 2005	77
Figura 33 -	Mapa de concentração de benzeno em 2001 e 2005.....	78
Figura 34 -	Simulação 3-D da concentração de benzeno em 2001 e 2005.....	79
Foto 1 -	Vista da Linha 1, canteiro entre pistas da rodovia..	41
Foto 2 -	Aquisição IP-resistividade e vista parcial do posto Gigio.....	42
Foto 3 -	Aquisição IP-resistividade com IPR-10A	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição das fases em derramamento de gasolina	7
Tabela 2 - Resistividade elétrica de alguns materiais	32
Tabela 3 - Propriedades eletromagnéticas de alguns materiais	45
Tabela 4 - Distância entre bobinas e profundidades atingidas	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API -	<i>American Petroleum Institute</i>
BTEX -	benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos
CETESB -	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
DNAPL -	<i>dense nonaqueous phase liquids</i> - líquido denso de fase não aquosa
EM-34 -	sistema eletromagnético EM-34
EPA -	<i>Environmental Protection Agency</i>
GPR -	<i>ground penetrating radar</i> - georradar
LNAPL -	<i>light nonaqueous phase liquids</i> – líquido leve de fase não aquosa
NAPL -	<i>nonaqueous phase liquids</i> - líquido de fase não aquosa
PAH -	<i>polycyclic aromatic hydrocarbon</i> – hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
RBCA -	<i>risk based corrective action</i> – ação corretiva baseada no risco
TIO -	<i>technology innovation program</i> – programa de inovação tecnológica
TPH -	<i>total petroleum hydrocarbon</i> – hidrocarbonetos totais de petróleo
VOC -	<i>volatile organic compounds</i> - compostos orgânicos voláteis
VOI -	valores orientadores de intervenção

LISTA DE NOMENCLATURAS

PM -	poço de monitoramento
PB -	poço de bombeamento
PI -	poço de injeção
PT -	poço tubular
PA -	poço cacimba
ST -	sondagem a trado
PEAD -	polietileno de alta densidade
<i>On site</i> -	dentro da área do posto de combustíveis
<i>Off site</i> -	fora da área do posto de combustíveis

RESUMO

A água subterrânea abastece grande parte da população e sua contaminação é assunto de interesse público. Os postos de combustíveis são fontes potenciais de contaminação, devido à sua extensa malha de distribuição e pelo armazenamento de produto ser predominantemente subterrâneo. Dentre os métodos para detecção de hidrocarbonetos, os geofísicos proporcionam investigação em maiores extensões, com mais rapidez e menor custo.

Este estudo apresenta os resultados de quatro métodos geofísicos (eletrorresistividade, polarização induzida, georradar e eletromagnético EM-34) na investigação de dois perfis a jusante de um posto de combustível com histórico de vazamento. Os objetivos foram de detectar a pluma de contaminação e identificar qual dos métodos apresenta os melhores resultados nesta situação.

A eletrorresistividade apresentou a melhor correlação com a zona contaminada e com as análises químicas. Os dados da polarização induzida também se relacionaram com a pluma. Os valores do sistema EM-34 ficaram aquém das expectativas. Os do georradar não possibilitaram nenhuma correlação com o substrato contaminado, certamente devido a pouca profundidade de penetração.

Foi constatado que a contaminação por hidrocarbonetos não oferece assinatura geométrica previsível, devido às condições dinâmicas do campo e suas inter-relações. Enquanto muitos trabalhos associam baixas resistividades aos vazamentos antigos, outros trabalhos mostram o inverso. Neste estudo, a anomalia encontrada apresentou alta resistividade associada às cargas mais altas.

ABSTRACT

A large portion of the population is supplied with groundwater, and this is a matter of public interest. Gas stations are potential sources of contamination for its extensive distribution network and for the underground storage. Among the existing methods for hydrocarbon detection, the geophysical ones provide a larger range, faster results at smaller costs.

This work presents the results of four geophysical methods (electrical resistivity, induced polarization, ground penetrating radar and electromagnetic EM-34) applied to the study of two profiles downwards of a leaking gas station. The objectives were detecting the contamination plume and identify which of the methods employed presents the best results on this site.

The electrical resistivity method presented the best correlation with the contaminated zone and chemical analysis. The results of the induced polarization were also associated with the contamination plume. Values obtained with the EM-34 didn't fulfill the expectations. GPR data didn't correlate with the contaminated substrate, certainly due to the shallow penetration depth.

It was observed that the hydrocarbon contamination does not offer a predictable geoelectrical signature, due to the dynamic conditions of the field and its inter relations. Whilst several paper associate low resistivities to older leakages, in other papers it was found the opposite. In this case study, the anomaly has shown characteristics of high resistivity associated to higher chargeabilities.

1 - INTRODUÇÃO

No Brasil, a água subterrânea abastece cerca de 60% do uso doméstico da população (IBGE, 2003), sendo que em estados como São Paulo, Maranhão e Piauí, este número alcança 80%. Diante desta inegável importância para grande parte da sociedade e da maior conscientização sobre assuntos ambientais, a questão de contaminação de água subterrânea é um assunto que desperta interesse. Dentre as várias fontes de contaminação existentes, os postos de combustíveis são bem representativos, pois em 2006 havia 2.479 postos revendedores autorizados (ANP, 2007). Adotando-se que em cada posto exista uma tancagem média de 60.000 litros de combustível, chega-se ao montante de quase 150.000.000 litros de produto armazenado subterraneamente, sem considerar os postos clandestinos ou os consumidores industriais.

Nos EUA, a questão de contaminação de postos de combustíveis vem sendo tratada desde a década de 80, quando se estabeleceu extenso programa de substituição dos tanques e de remediação dos sítios contaminados. Na década de 90, verificou-se que, embora as informações existentes fossem de alta qualidade, estas eram poucas, o que dificultava os trabalhos de remediação. Desta maneira, foi estimulada a utilização da geofísica na detecção de hidrocarbonetos, resultando em maior rapidez e menor custo na caracterização de grandes extensões.

No final de 2004 e início de 2005, para elaboração deste trabalho, foram utilizados quatro métodos geofísicos para detectar contaminação de combustível em um posto de serviços do município de Atibaia, SP. A investigação de duas linhas a jusante do posto por eletrorresistividade, polarização induzida, georradar e eletromagnético trouxe resultados que foram relacionados com os dados químicos do local.

2 - OBJETIVOS

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos:

1. Detecção de pluma de contaminação de hidrocarbonetos de petróleo proveniente de vazamento de combustível em posto de serviço.
2. Verificação de qual dos seguintes métodos geofísicos: eletrorresistividade, polarização induzida, georradar e eletromagnético apresenta melhor desempenho na detecção da pluma de contaminação.

3 - REVISÃO DA LITERATURA

3.1 – Características dos Hidrocarbonetos

No petróleo existem centenas de hidrocarbonetos, que são os compostos mais simples dentro da química orgânica e constituem-se de hidrogênio e carbono. Este combustível fóssil é originado a partir do soterramento de matéria orgânica (principalmente algas) juntamente com sedimentos lacustres ou marinhos em ambiente anaeróbico.

Até chegar à sua utilização final, os derivados de petróleo passam por vários processos de destilação, refinamento, aditivação e beneficiamento e esta industrialização contribui para aumentar a complexidade dos produtos finais. A composição química do óleo cru e dos produtos derivados depende do local de origem e dos processos de industrialização.

Os líquidos contaminantes costumam ser denominados líquidos de fase não aquosa, NAPL (*nonaqueous phase liquids*) e são divididos nas categorias leves e densos. Os LNAPLs (*light nonaqueous phase liquids*) são líquidos mais leves que a água e os DNAPLs (*dense nonaqueous phase liquids*), mais densos que a água. A maioria dos combustíveis flutua na água subterrânea caracterizando-se como LNAPLs.

O API (2004), *American Petroleum Institute*, classifica como principais tipos de LNAPL, os seguintes combustíveis: gasolina, destilados médios (diesel e querosene) e combustíveis pesados e óleos lubrificantes. No Brasil também é utilizado o etanol como combustível, aparecendo na forma hidratada (álcool da bomba de combustível) e como mistura para gasolina (álcool anidro).

A gasolina é constituída por inúmeros compostos, que são predominantemente alifáticos e aromáticos, sendo que no segundo grupo, os compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) costumam ser os mais significativos, por sua maior volatilidade e solubilidade e conseqüente maior risco de atingir a água subterrânea. A composição da gasolina varia de acordo com o local onde é produzida, sendo que para a gasolina norte americana, o API (2004) indica que aproximadamente 20% em massa é constituído por compostos BTEX, e disto, a maior fração é de tolueno. Os compostos PAH (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos) não ocorrem ou aparecem em quantidade muito pequena, por que têm moléculas com alto peso molecular e alto

ponto de ebulição. A exceção é o naftaleno, que pode aparecer na proporção de 0,5% em massa. O benzeno costuma ser o composto mais preocupante por seu potencial carcinogênico provocado no ser humano.

Uma particularidade da gasolina brasileira é que possui cerca de 24% de etanol. Esta adição serve para aumentar a octanagem e diminuir a emissão de monóxido de carbono para a atmosfera. Desta forma, é necessário observar que alguns estudos internacionais desenvolvidos com gasolina podem não ser aplicados à nossa realidade. Isto porque os países desenvolvidos são os maiores geradores de tecnologias de remediação e detecção de plumas de hidrocarbonetos e não costumam adicionar etanol à gasolina ou adicionar um percentual bem inferior àquele adicionado no Brasil.

Vários autores, dentre eles GUIGUER (1996) e CORSEUIL & MARINS (1997) indicam que a presença de etanol pode apresentar comportamento co-solvente, possibilitando o aumento da solubilidade da gasolina em água e, conseqüentemente, aumentando o impacto ambiental no caso de um derramamento da gasolina com etanol. Além disto, CORSEUIL & MARINS (1998) destacam que o etanol pode ser biodegradado em preferência aos compostos BTEX, inclusive podendo inibir a biodegradação destes.

Os destilados médios (diesel e querosene) são predominantemente compostos por hidrocarbonetos de cadeias C10 a C20 e têm uma grande concentração de cicloalcanos e PAHs. Os compostos PAHs são formados pela união de dois ou mais anéis de benzeno, sendo que o naftaleno é o mais simples deles, composto apenas por dois anéis de benzeno. Entretanto, os destilados médios apresentam pequenas concentrações de BTEX, aproximadamente 2%, fazendo com que estes produtos sejam mais densos, menos voláteis, menos solúveis e menos móveis que a gasolina. Para vazamentos antigos típicos, os compostos BTEX tendem a se degradar e dispersar para níveis de concentração muito baixos.

Além dos parâmetros BTEX e PAH citados acima, o TPH (*total petroleum hydrocarbon*) também é de interesse nas contaminações por hidrocarbonetos de petróleo.

CALABRESE & KOSTECKI (1991) questionam o termo *total* na sigla TPH, pois na realidade não é representada a quantidade total de hidrocarbonetos existente em uma amostra, mas apenas algumas faixas de hidrocarbonetos. Embora o método 418.8 do EPA (*Environmental Protection Agency*) seja o mais usual para a determinação do

TPH, existem outros que também determinam este parâmetro, por isso, antes de se analisar os resultados, é necessário avaliar qual metodologia foi adotada. A quantidade de hidrocarbonetos depende do tipo de produto derivado de petróleo e também da sua maturidade. Os compostos PAH são um dos grupos mais perigosos dentre os TPHs, pois migram para plantas que crescem em solos contaminados. Os compostos mais leves, inclusive os BTEX, não costumam ter avaliação muito precisa nos ensaios de TPHs.

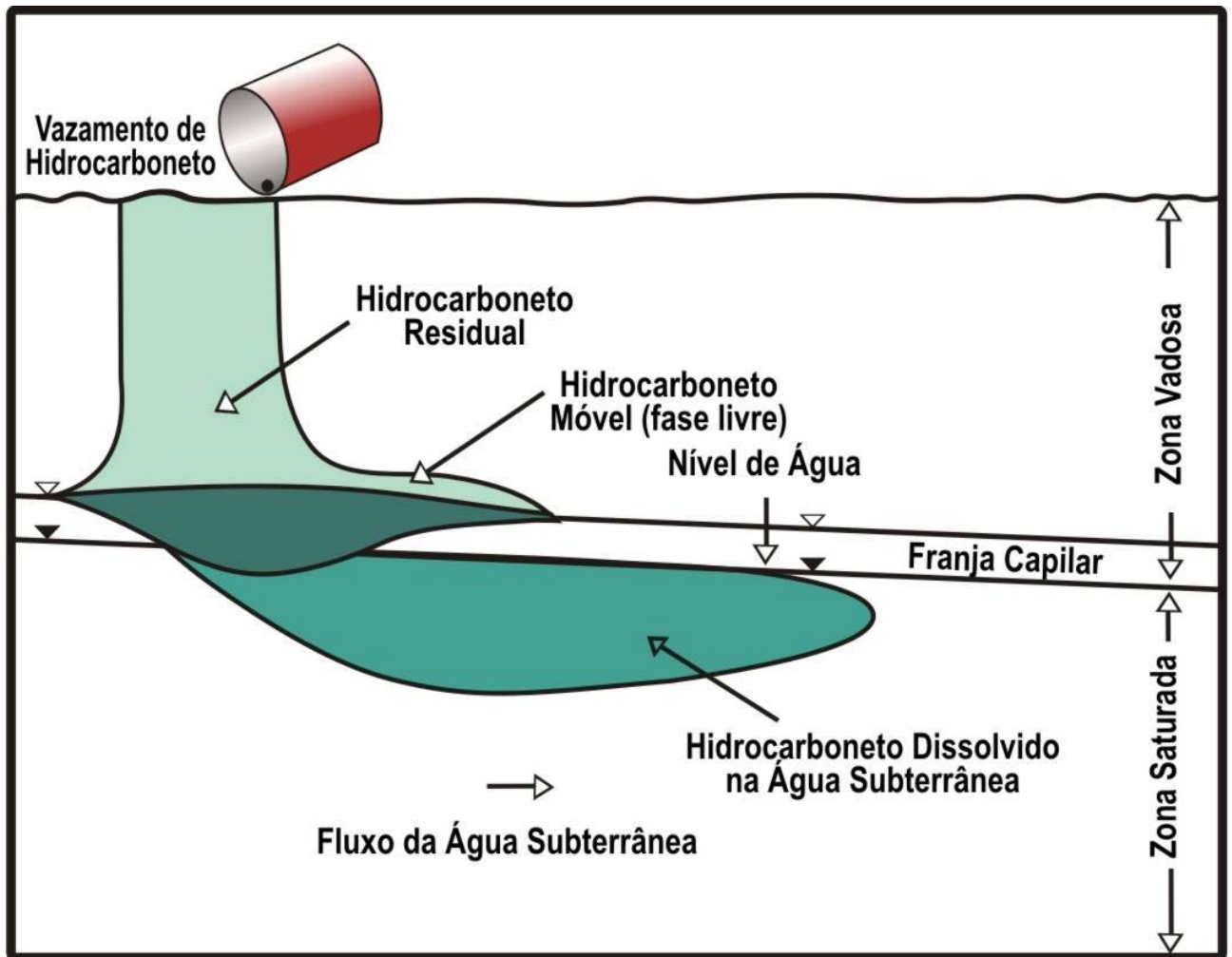
Segundo a CETESB (2006), para a identificação de passivos ambientais em postos de combustíveis com tanques subterrâneos é exigida a determinação de BTEX e PAH. Nas áreas próximas à troca de óleo e armazenamento de óleo usado deve ser determinado o TPH.

Os óleos lubrificantes e combustíveis pesados tendem a ser relativamente imóveis e insolúveis.

3.2 - Fases dos Hidrocarbonetos e Características da Pluma

Em um vazamento de combustíveis, o produto se movimentará descendente pela gravidade e de acordo com as forças capilares e condutividade hidráulica do solo. Os hidrocarbonetos liberados em subsuperfície por um vazamento, aparecem em diversas fases e sua migração, assim como as técnicas de remediação acontece de acordo com cada fase.

Existe alguma variação entre autores na classificação das fases dos hidrocarbonetos: GUIGUER (1996) divide em fase líquida, dissolvida e vapor; OLIVEIRA (1992) classifica em sorvida, livre e dissolvida, SAUCK *et al* (1998) divide em imiscível ou livre, residual, vapor e dissolvida etc. A Figura 1 traz a classificação de FETTER (1999).



Fonte: Modificado de FETTER (1999).

Figura 1 – Comportamento de LNAPL na água subterrânea

A fase residual é a que fica depois da passagem do contaminante na fase líquida e acontece quando o LNAPL fica retido pelas forças capilares do solo ou preso entre os espaços dos poros. Este material residual atuará como fonte de contaminação, posteriormente provocando dissolução em água e volatilização em vapor no solo. As flutuações verticais do nível de água subterrânea também provocam um espalhamento do produto, podendo criar fase residual.

A fase móvel (mais conhecida como fase livre) ocorre quando a saturação de LNAPL excede a saturação residual gerando uma fase contínua entre os poros da matriz do solo. Este volume de LNAPL móvel pode se deslocar vertical ou horizontalmente, de acordo com as flutuações do nível d'água. Entretanto, para haver o movimento, além

da mobilidade potencial, também é necessário haver um gradiente e condutividade hidráulica.

A fase dissolvida acontece quando existe o contato dos hidrocarbonetos com a água subterrânea e a quantidade de material dissolvido depende da solubilidade dos constituintes dos hidrocarbonetos.

Embora não representados na Figura 1, os hidrocarbonetos da fase vapor, resultam da volatilização dos compostos da fase líquida presentes na zona não saturada. Estes hidrocarbonetos também podem se volatilizar dos residuais e, em menor escala, a partir daqueles da fase dissolvida.

Entretanto, independente da classificação adotada, a fase dissolvida costuma ser a mais preocupante pelo impacto ambiental que pode causar. A Tabela 1 dá um exemplo da distribuição das fases de um vazamento de gasolina em aquífero de areia média e nível de água de 5m.

Tabela 1 – Distribuição das fases em derramamento de gasolina.

Fase	Volume contaminado (m ³)	% do Total contaminado	Volume de contaminante (m ³)	% do Total de contaminante
Livre	7.100	1,0	18.500	62
Sorvida	250.000	20,0	10.000	33
Dissolvida	960.000	79,0	333	1 - 5

Fonte: Groundwater Technology Inc., 1983, apud OLIVEIRA, 1992.

Percebe-se que a fase livre representou 62% do volume total de gasolina derramado, mas contaminou apenas 1% do total do sítio. Por outro lado, a fase dissolvida que continha apenas 5% do volume vazado, contaminou 79% do total, demonstrando que o fluxo de água subterrânea é um mecanismo com forte capacidade de espalhamento dos contaminantes, devido à sua grande mobilidade.

No lançamento de LNAPL em subsuperfície em decorrência de vazamento, parte dele fica retida nos poros do solo pelas forças capilares como produto residual ou imóvel. A parte restante e móvel continua a migrar, mas o volume livre de produto tende diminuir, pois é bloqueado pela rede de poros do solo e não é fácil o óleo coalescer formando uma espessura consistente. Portanto, a menos que sejam alimentadas por um

vazamento contínuo, as plumas contaminantes se auto limitam no espaço. Este conceito distingue a pluma de LNAPL da pluma dissolvida e da pluma de vapor que podem migrar por distâncias significativas, criando uma área impactada bem maior que a fonte original.

A pluma dissolvida é influenciada por vários parâmetros, como velocidade da água subterrânea, composição do produto contaminante, dispersão, sorção e biodegradação.

A solubilidade de um composto é a máxima concentração que ele pode se dissolver em água em determinadas condições de pressão e temperatura. Entretanto, esta concentração só seria obtida se o LNAPL fosse constituído de um único composto. Como os hidrocarbonetos são constituídos por centenas de compostos, a solubilidade final será menor que a solubilidade individual de cada um. A Lei de Raoult (RUSSEL, 2004) define que a solubilidade da mistura é a solubilidade de cada composto multiplicado por sua fração molar na mistura. Desta maneira, considerando que a transferência de massa depende da solubilidade e do percentual dos componentes na mistura, os hidrocarbonetos constituídos de um alto percentual de produtos muito solúveis irão se dissolver mais rapidamente que aquela mistura com predominância de compostos de baixa solubilidade. Sendo assim, o impacto da gasolina dissolvida acaba sendo maior que o dos óleos combustíveis.

O fenômeno que faz com que os hidrocarbonetos movimentem-se mais lentamente que a água subterrânea denomina-se retardamento. Isto acontece devido à sorção (soma da absorção e adsorção) do hidrocarboneto dissolvido com um sólido, e que é incrementada pelo acréscimo do teor de carbono orgânico presente no solo, normalmente proveniente de argilas e turfas.

A transferência de massa de uma contaminação de hidrocarbonetos para a fase vapor depende da sua composição, sendo que a pressão de vapor de um composto puro é a máxima concentração que pode existir de fase vapor em uma determinada temperatura e pressão. Como os hidrocarbonetos são constituídos de inúmeros compostos, novamente utiliza-se a Lei de Raoult que estabelece que a pressão de vapor da mistura seja a pressão de vapor de cada composto multiplicado por sua fração molar na mistura. Conclui-se que a gasolina, pelo seu alto teor de BTEX, apresentaria um impacto de volatilização maior que o diesel ou outro óleo combustível.

Pelo fato dos hidrocarbonetos atuarem como fontes de contaminação dissolvida e volátil, foram desenvolvidas várias tecnologias para reter o produto móvel e o residual. A aplicabilidade de cada tecnologia depende dos seguintes fatores: condições hidrogeológicas, natureza e distribuição do LNAPL, objetivos da remediação, recursos e tempo disponíveis etc. A extração do produto residual costuma ser mais problemática e muitas vezes é impraticável se fazer uma limpeza rápida no local. Embora fatores físicos possam limitar a movimentação da contaminação e a atenuação natural também contribua para diminuir a migração da pluma dissolvida e de vapor, a extração do produto na fase livre costuma ser muito desejável pelo perigo potencial de contaminar a água subterrânea.

A maneira que ocorre o vazamento de produto e o gradiente do nível de água subterrânea são fatores significativos que influenciam a migração dos hidrocarbonetos em subsuperfície. Os seguintes parâmetros têm influência especial na formação da pluma de LNAPL: razão entre o vazamento do produto e a permeabilidade do solo, tipo de tancagem e profundidade e orientação do nível de água (API, 2004).

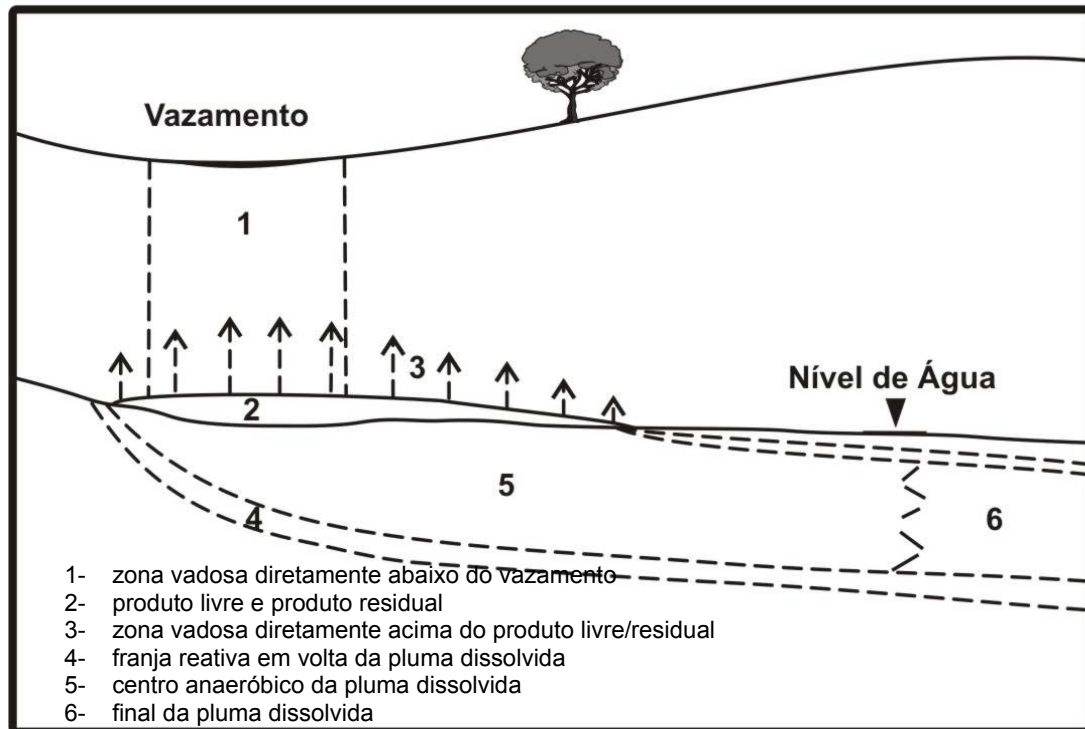
DANIELS *et al* (1995) descrevem que estudos hidrogeológicos mostram que os hidrocarbonetos não se dispersam uniformemente no regolito, mas movem-se na zona não saturada com discretos acúmulos de contaminantes. A migração típica destes contaminantes depende das características físicas e químicas do regolito original. O comportamento dos contaminantes na fase vapor e na franja capilar são fortemente determinados pela hidrogeologia da zona vadosa.

O API (2004) indica que o termo estabilidade (*stability*) é usado para definir a expansão e migração da pluma. Em alguns casos, embora a fonte de vazamento tenha cessado, a pluma pode permanecer com uma configuração estável por meses chegando até alguns anos. A redistribuição do LNAPL dentro da pluma pode se modificar ao longo do tempo, mas ela permanece estática. Frequentemente são encontrados casos em que a pluma é estável, mas seu centro tem uma saturação de LNAPL que excede o nível residual.

GUIGUER (1996) salienta as características que mais afetam a movimentação e retenção dos combustíveis no solo: densidade (relação entre massa e volume), viscosidade (resistência de fluido para escoar), solubilidade (quanto um constituinte pode se dissolver em água) e pressão de vapor (tendência do líquido se volatilizar e

passar para a fase vapor). Normalmente o solo é classificado pela textura e teor de argila, silte e areia. O tamanho e a ligação dos poros definem o movimento dos fluidos na subsuperfície e, geralmente, quanto maiores as partículas do solo, maiores os espaços vazios e maior a permeabilidade. Em solos mais grossos o óleo pode facilmente expulsar a água e a saturação de LNAPL pode ser bem elevada porque o maior tamanho dos poros diminui as forças capilares e facilita a entrada do óleo. Por outro lado, em solos mais finos o óleo não desloca a água, a saturação de óleo fica menor e a retenção de óleo maior. Quando o fluido ocupa todo o espaço do poro, a força capilar é pequena e o movimento acontece por gradiente hidráulico. Porém, quando o fluido ocupa apenas parte do espaço entre os grãos, as forças capilares tornam-se dominantes e é necessária muita energia para retirar os contaminantes dos poros muito pequenos.

Destaca-se que estudos feitos para caracterizar a pluma contaminante em subsuperfície normalmente visam estabelecer o potencial risco que ela pode provocar no local e definir as melhores técnicas de remediação. A Figura 2 traz o modelo de pluma proposto por SAUCK (2000), que identifica zonas de contaminação provocadas por vazamento de hidrocarboneto em terreno arenoso. Cada área traz características distintas que dependem de fatores como volume e continuidade do vazamento, espessura do produto livre, descontinuidade do produto residual, volume da zona vadosa etc. Devido ao caráter dinâmico do vazamento é apontada uma região anômala de baixa resistividade na parte inferior da zona vadosa e superior ao aquífero, onde acontecem as flutuações do nível de água e a atividade microbiológica é máxima. Esta anomalia condutiva encontra comprovação nos resultados do método GPR (ground penetrating radar) através de atenuação das reflexões e zonas de sombra e, por medições diretas no VRP (vertical resistivity probes).



Fonte: Modificado de SAUCK (2000).

Figura 2 – Modelo de definição de áreas em um vazamento de LNAPL.

Vários estudos (ATEKAWANA *et al*, 2000; WERKEMA *et al*, 2002; SAUCK *et al*, 1998) encontraram resultados geofísicos e geoquímicos coincidentes com o modelo proposto por SAUCK (2000), que tratam a pluma contaminante como um sistema dinâmico e dependente das condições específicas do local.

3.3 – Geofísica na Detecção de Hidrocarbonetos

Os métodos geofísicos de investigação de subsuperfície normalmente utilizam equipamentos dispostos no nível do solo e apresentam-se como não invasivos e não destrutivos. São avaliados contrastes nas propriedades físicas de subsuperfície que podem ser originados de diferenciações litológicas e de heterogeneidades naturais ou provocadas. Em grandes áreas, o método geofísico costuma ser mais rápido e apresentar custo menor que a sondagem, sendo interessante para orientar a locação de investigações diretas (sondagens, poços de monitoramento) e estimar o volume de

material a ser removido ou remediado. Porém, a facilidade de aplicação em sítios maiores é contrabalançada por uma menor precisão na detecção das anomalias.

Até recentemente, a investigação tradicional de locais contaminados era feita através da escavação de poços, monitoramento por coleta de amostras e análise laboratorial do solo e água. Entretanto, estes procedimentos acabaram trazendo interpretações errôneas e inadequadas destas áreas, pois muitas vezes assumia-se que as características de subsuperfície eram uniformes, resultando em amostragens pouco representativas ou, na hipótese de se escavar vários poços, gerando elevados gastos de tempo e dinheiro. Além disto, a provável introdução de novas variáveis na escavação dos poços, somada ao perigo de se escavar lugares desconhecidos, adicionavam algumas dificuldades na investigação (BENSON & NOEL 1984).

De acordo com o EPA, *Environmental Protection Agency* (2000), na década de 90 ocorreu uma grande modificação na sistemática de investigação de locais contaminados, pois as informações existentes, embora fossem de alta qualidade, eram poucas e de alto custo. Em função disto, setores do governo federal norte americano, responsáveis por remediar estes locais, adotaram processos de investigação expedita e a geofísica foi um dos escolhidos. Durante décadas esta técnica foi utilizada quase exclusivamente na indústria do petróleo e mineração, porém acabou encontrando novo campo de aplicação na área de contaminantes. Com o objetivo de estimular o uso da geofísica, o TIO/EPA (*Technology Innovation Program's*) divulgou vários estudos de casos de áreas contaminadas e investigadas com esta técnica. No caso das contaminações por hidrocarbonetos de petróleo, verificou-se que a geofísica auxiliou na detecção e delineamento das plumas. Além disto, o uso integrado desta tecnologia com outros métodos de escavação permitiu maior confiabilidade na análise dos resultados, as plumas maduras de hidrocarbonetos de petróleo puderam ser detectadas como solos eletricamente condutivos, havendo aumento da condutividade do solo provocado pela biodegradação natural. O desempenho do GPR (*Ground Penetrating Radar*) foi melhorado com o uso de diferentes antenas, além de se conseguir identificar com facilidade o nível de água.

Sabendo-se que para uma utilização adequada da geofísica na investigação de sítios contaminados é conveniente considerar uma série de informações do local, a Figura 3 apresenta o plano de avaliação destas áreas proposto por BENSON & NOEL (1984).



Fonte: modificado de: **BENSON & NOEL, 1984.**

Figura 3 - Plano de avaliação de locais contaminados.

Na parte central do esquema estão os objetivos primários, que compreendem a localização, tipo e quantidade do contaminante, verificação de barreiras limitadoras, determinação da presença e direção da pluma, distribuição dos contaminantes, condições hidrogeológicas, tipo de solo e rocha, determinação do nível de água, direção e profundidade da água subterrânea, retardamento dos contaminantes, anomalias na seção hidrogeológica etc. Ao redor da parte central aparecem como objetivos secundários as condições da superfície do local (topografia, vegetação, cenário natural, geomorfologia etc.), de subsuperfície (solo, rocha, hidrologia etc.), influência de temperatura e precipitação na estabilidade e migração do contaminante, capacidade da área de recarga de promover maior penetração, presença de rochas fraturadas etc. Também devem ser avaliadas características culturais (pavimentação, drenagem, construções subterrâneas, aterros etc.), características dos resíduos perigosos (tipos, formas, disposição, danos à saúde e meio ambiente etc.), interação dos resíduos e cenários naturais (fluxo da água subterrânea, permeabilidade da rocha, transporte do contaminante por advecção, dispersão e difusão, características físico-químicas da rocha etc.). Outras informações como disponibilidade e precisão dos dados levantados, verificação de instalações de apoio, interferência da vizinhança do

local contaminado etc., também devem ser adicionados à análise de áreas contaminadas.

Segundo a CETESB (1999), a utilização de metodologia geofísica na investigação de áreas contaminadas pode acontecer nas etapas de investigação confirmatória (localização de pontos com maior concentração de contaminantes e mais adequados para amostragem), investigação detalhada ou para remediação (mapeamento da pluma contaminante) e acompanhamento da remediação (verificação da redução dos contaminantes).

Como se trata de uma ferramenta indireta de prospecção, a geofísica é mais efetiva quando combinada com resultados químicos e biogeoquímicos, dados históricos e geológicos, uso de diferentes métodos geofísicos, amostras de poços etc. De acordo com EPA (1997), embora as ferramentas geofísicas não sejam tão eficientes na verificação da extensão do produto na fase dissolvida, elas assumem um papel relevante no mapeamento do produto residual na zona vadosa e no produto livre sobre o nível de água subterrânea. Cada método tem a sua melhor condição de aplicação e enquanto alguns não conseguem detectar pequenas espessuras de LNAPL, outros detectam com mais facilidade os vazamentos antigos que os novos devido ao espalhamento do produto provocado pelas flutuações do nível de água. Também existem os casos em que são detectadas variações geológicas e que não devem ser confundidos com o comportamento do contaminante.

NOBES (1996) afirma que a geofísica ambiental tem crescido muito nos últimos anos e os métodos elétricos e eletromagnéticos desempenham papel de destaque neste cenário. Uma das razões da utilização destes métodos na água subterrânea é a similaridade do caminho percorrido pelo fluxo da corrente elétrica e pelo fluxo de água, que dependem da conectividade dos poros nos solos e rochas.

As investigações geofísicas têm sido cada vez mais utilizadas na detecção de contaminações de LNAPL, particularmente as metodologias de resistividade elétrica, GPR e EM (ATEKWANA *et al.*, 2000; CASSIDY *et al.*, 2001). DANIELS *et al* (1995) ainda sugerem que as técnicas de baixa frequência seriam particularmente aplicáveis para localizarem fluidos de alta condutividade enquanto as técnicas de alta frequência, como o GPR, seriam melhor aplicáveis na detecção de contrastes em permissividade

dielétrica. Entretanto, sabe-se que esta afirmação não é totalmente aplicável aos hidrocarbonetos, já que não apresentam assinatura geoeletrica fixa.

OLHOEFT (1992) indica que a resposta da metodologia geofísica na detecção de hidrocarbonetos é bastante satisfatória quando se faz comparações entre medições repetidas periodicamente, pois os métodos elétricos e eletromagnéticos são extremamente sensíveis na indicação de mudanças. Porém, DANIELS *et al.* (1995) demonstram em estudo de campo em solo arenoso que a repetibilidade das medições de GPR dependem consideravelmente das condições pluviométricas do local, salientando que os resultados de melhor qualidade foram encontrados nas subsuperfícies não saturadas. Isto é um indicador que o GPR é mais eficiente em solos pouco úmidos ou secos, mais resistivos, e também, que a umidade provoca muitas alterações na resistividade do local.

Na metodologia geofísica é fundamental que haja contraste entre as propriedades do contaminante com o meio. O método GPR utiliza o parâmetro da permissividade dielétrica para a detecção dos contaminantes e o alto contraste entre a água subterrânea e os hidrocarbonetos contribui para a investigação, pois enquanto a água apresenta constante dielétrica K igual a 80, os hidrocarbonetos apresentam K numa faixa entre 2 a 30 (OLHOEFT, 1992; DANIELS *et al.* 1995). OLHOEFT (1992) afirma que o GPR apresenta melhores resultados na detecção de hidrocarbonetos quando ocorre o encharcamento do solo, notadamente devido às oscilações verticais do nível de água que espalham o produto. Porém, sabe-se que o problema em confiar nos valores de condutividade elétrica dos hidrocarbonetos para detectá-los, é que estas características podem aumentar, diminuir ou apresentar pouca alteração, dependendo das condições específicas do local, como variação do nível de água, presença de argila etc.

Como o hidrocarboneto puro na fase líquida possui alta resistividade, seria intuitivo supor que a pluma contaminante também fosse detectada da mesma maneira. Confirmando esta hipótese, MAZÁC *et al.* (1990) propuseram um modelo de alta resistividade elétrica, e que foi comprovado por vários estudos em ambientes fechados, controlados e com vazamentos recentes.

Porém, enquanto experimentos de laboratório defendem a idéia da alta resistividade elétrica, as condições de campo apontam alta condutividade. Vários fatores da

dinâmica do campo contribuem para este resultado tais como: movimento lateral da água subterrânea e do LNAPL, movimentos verticais devidos a alterações no nível de água, tipo de hidrocarboneto (produtos com menor viscosidade sofrerão retardamento por adsorção de maneira diferente dos produtos mais viscosos), efeitos da biodegradação, variações de temperatura, chuva, heterogeneidade da subsuperfície, tipo de vazamento etc. (ATEKWANA *et al.*, 2000; SAUCK, 2000; SAUCK *et al.*, 1998).

Basicamente, as modificações nas propriedades elétricas acontecem devido às reações de biodegradação, que formam ácidos carbônicos e orgânicos, alterando os processos químicos do sistema, de maneira que a região com os ácidos fique enriquecida com sólidos dissolvidos, gerando o efeito de maior condutividade elétrica dentro e abaixo da zona de biodegradação (SAUCK, 2000; CASSIDY *et al.*, 2001; BATAYNEH, 2005).

A fase vapor do hidrocarboneto também pode alterar a permissividade dielétrica da subsuperfície, conforme estudo de laboratório de DANIELS *et al.* (1995) que demonstraram as diferenças registradas na permissividade dielétrica (ϵ) da areia quando submetida à presença de gasolina. Foram encontrados os valores de ϵ igual a 2,50; 3,19 e 3,4 respectivamente na zona acima da franja capilar, na franja capilar e na zona saturada com produto.

Alguns hidrogeólogos verificaram que o produto livre não apresenta fase 100% contínua, pois a saturação de hidrocarboneto não costuma alcançar nem 50%, e o espaço restante seria preenchido por água e ar, criando ótimas condições para a ação de micróbios aeróbicos (SAUCK *ET AL*, 1998; SAUCK, 2000). Enquanto isto, FETTER (1999) indica que os hidrocarbonetos formam um substrato para o crescimento microbial, proporcionando uma fonte de energia para os micróbios através de um biofilme nas superfícies sólidas do aquífero, sendo que estudos demonstram a ocorrência de biodegradação tanto em compostos BTEX, como nos PAHs, em condições aeróbicas e anaeróbicas. AAL *et al.* (2006) acreditam que a acumulação das bactérias na superfície dos grãos (biofilmes) aumenta a polarização interfacial e causam as respostas relativamente altas de IP nas amostras contaminadas com hidrocarbonetos, indicando que esta metodologia geofísica mostra-se bastante

adequada para investigar locais contaminados com hidrocarbonetos e com biodegradação ativa.

Embora ainda bastante citado na literatura, o modelo intuitivo de MAZÁC *et al.* (1990) parece estar sendo substituído pelo proposto por SAUCK (2000), comentado acima. Também existe alguma tendência em esperar encontrar maior resistividade elétrica nos vazamentos mais recentes e maior condutividade nos mais maduros, devido à biodegradação.

Porém, a variedade de fatores presentes nos estudos de campo gera maior dificuldade de interpretação dos resultados (FETTER, 1999) e muitos deles têm apresentado resultados contraditórios nas respostas elétricas e eletromagnéticas dos contaminantes. Existem vários estudos desenvolvidos no mapeamento e monitoramento de contaminações por hidrocarbonetos de petróleo e abaixo são citadas algumas experiências com utilização de metodologias geofísicas.

AZAMBUJA *et al.* (1999) destacam a utilização de eletrorresistividade na detecção de hidrocarbonetos em cinco contaminações de postos de combustíveis, com o uso dos arranjos SEV (Sondagem Elétrica Vertical) e caminhamento elétrico. O estudo não menciona a idade das contaminações, mas elas são detectadas como anomalias resistivas, que são comprovadas por análises geoquímicas. O sítio que proporcionou a melhor correlação entre a eletrorresistividade e as análises geoquímicas foi aquele com o solo mais argiloso e nível de água mais raso, e que provocou maior contraste elétrico com o caráter resistivo da contaminação.

ATEKWANA *et al.* (2000) estudaram uma pluma de contaminação antiga de hidrocarbonetos pelos métodos de resistividade, GPR e EM, encontrando resultados que corroboram com o proposto por SAUCK (2000): regiões com atenuação das reflexões do GPR, zonas de sombra, coincidentes com menores resistividades aparentes, que foram associadas à biodegradação.

DEHAINI (2001) utilizou o GPR objetivando comprovar a eficiência da metodologia na detecção de pluma de gasolina de posto de combustível em situação adversa: área urbana densamente povoada, alto nível de ruído externo, litologia argilosa e ausência de fase livre. A pluma foi detectada como uma anomalia na forma de ausência de sinal

(zona de sombra), sendo que os melhores resultados foram obtidos com antena blindada de 250 MHz.

DELANEY *et al.* (2000) apresentam alguns experimentos de determinação de eletrorresistividade em contaminações por hidrocarbonetos. Tanto as medições em laboratório quanto as realizadas em sítio de contaminação antiga indicaram aumento de eletrorresistividade quando se diminuiu o teor de água, aumentou-se o teor de hidrocarboneto ou aconteceu o congelamento. Segundo os autores, este comportamento deve-se à granulometria fina do solo (areia fina e silte) que, durante um vazamento, proporciona aderência dos hidrocarbonetos na superfície das partículas do solo, restringindo a mobilidade dos íons na água capilar.

GODIO & NALDI (2003) usaram a eletrorresistividade para analisar um vazamento antigo de tanques diesel, em subsuperfície arenosa e nível de água de cerca de 5m. Foi considerado que a pluma contaminante poderia apresentar-se seguindo um dos dois modelos de resistividade mais conhecidos: como uma pluma condutiva devido à biodegradação e abrangendo a zona vadosa e saturada ou, de acordo com o segundo modelo, como uma fina camada muito resistiva acima do nível de água (camada asfáltica). Os resultados de campo indicaram que a pluma comportou-se com uma anomalia de alta condutividade, comprovado por análises químicas do solo e da água.

O trabalho de CASTRO & BRANCO (2003) traz o acompanhamento por GPR das mudanças da pluma de gasolina de um posto urbano, provocadas pela remediação por bombeamento. Dentre as antenas estudadas, foram escolhidas as de 200 e 400MHz por apresentarem melhor resolução e penetração. A fase vapor na zona vadosa foi identificada por uma diminuição das reflexões, as fases livre e residual diretamente acima do nível de água foram associados ao aumento das reflexões e a zona saturada aparentemente apresentou-se com mais reflexão devido aos hidrocarbonetos dissolvidos na água.

VEGA *et al.* (2003) delimitaram uma pluma de contaminação de gasolina por eletrorresistividade, com os arranjos dipolo-dipolo e Wenner. Embora o vazamento fosse antigo, a pluma ainda apresentava características de alta resistividade, contrária à esperada alta condutividade que caracteriza as plumas mais maduras pelo efeito da biodegradação. Concluiu-se que a biodegradação do local era muito lenta, provavelmente devido à confinamento do aquífero por lentes de argila e que ainda não se

conhece claramente a influência da argila nas reações biogeoquímicas, o que poderia justificar esta alta resistividade.

LORENZO *et al.* (2004) utilizaram GPR em areia de praia contaminada com óleo combustível, proveniente de afundamento de navio cargueiro. A contaminação chegava à praia depositando-se sobre a areia, mas devido ao movimento da maré enterrava-se em camadas de diferentes profundidades. O combustível original tinha alta resistividade e baixa permissividade relativa, mas após o contato com a água do mar e água da chuva, tornou-se uma mistura viscosa e de modelo complexo. Após testes de antenas, investigações em área piloto, definição de laptop etc, o GPR detectou várias camadas do combustível em áreas mais internas da praia, apresentando-as como reflexões, devidamente confirmadas por escavações posteriores no local.

BATAYNEH (2005) traz o uso da eletrorresistividade para localização de tanques subterrâneos de um posto de combustível e a respectiva pluma contaminante. São comparados os valores obtidos pelos arranjos dipolo-dipolo e Wenner, encontrando-se melhor qualidade no dipolo-dipolo, visto que o Wenner apresentou resolução inferior que foi atribuída à menor quantidade de dados gerados. Não foi citada a idade do vazamento, mas foram obtidos valores de alta condutividade na área supostamente contaminada, que foram confirmados por trabalhos posteriores de escavação que encontraram linhas danificadas de produto ligadas aos tanques subterrâneos.

BRAGA & CARDINALLI (2005) apresentam estudo de laboratório em que se mede eletrorresistividade e cargabilidade em área contaminada por gasolina concluindo que o fator tempo decorrido é fundamental para obtenção da assinatura geoeétrica da contaminação. Nos vazamentos mais recentes espera-se encontrar altas resistividades e baixas cargabilidades, enquanto nos vazamentos mais antigos a tendência é encontrar baixas resistividades e altas cargabilidades.

PEDROSA *et al.* (2005) apresentam investigações com GPR em pluma de contaminação de vários postos de combustíveis de área urbana litorânea. O georradar confirmou a presença de plumas nos postos comprovadamente contaminados e nos suspeitos, através da assinatura de zonas de baixa reflexão, que foi confirmado por análises dos parâmetros BTEX e hidrocarbonetos totais. Entretanto, no caso da contaminação diesel, a pluma não foi detectada de forma conclusiva pela dificuldade de

mapear este contaminante pelo baixo nível de contraste dielétrico do produto com a matriz solo-rocha.

AAL *et al.* (2006) apresentam estudo do desempenho de IP em amostras coletadas de sítio de contaminação antiga de hidrocarbonetos. São comparadas amostras com e sem contaminação, concluindo que as amostras contaminadas e com processos ativos de biodegradação são as que apresentam maior resposta IP. Também são analisadas respostas de IP em amostras nas fases residual e dissolvida, concluindo que a diferença das características elétricas é mais acentuada na fase residual, provavelmente devido à maior taxa de biodegradação.

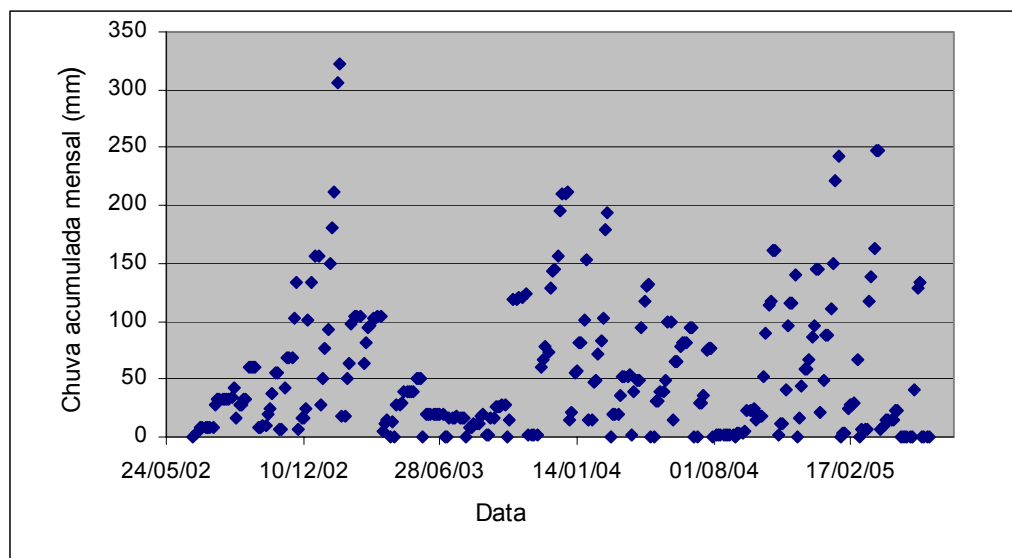
Percebe-se que os estudos realizados com a aplicação da geofísica para detecção de hidrocarbonetos não apresentam resultados totalmente presumíveis, devido à diversidade de variáveis que interferem no comportamento do produto. SAUCK (2000) descreve esta situação em seu modelo de resistividade de plumas de LNAPL, em que divide a pluma em seis regiões, mas não fornece assinatura geoelétrica fixa para cada uma delas, preferindo comentar como fatores do campo alterariam o resultado encontrado em cada uma delas. Além disso, o modelo de SAUCK (2000) também aponta características condutivas na pluma contaminante antiga e, particularmente, na área inferior da zona vadosa e acima do aquífero, onde o nível de biodegradação seria máximo.

Entretanto alguns estudos relacionados acima encontram plumas resistivas mesmo para vazamentos antigos que, talvez, demonstrem que a característica condutiva ou resistiva da pluma não estaria tão vinculada à sua idade, mas à possibilidade de haver ou não biodegradação no local.

Além da assinatura elétrica dos hidrocarbonetos ser influenciada pelo tempo decorrido e condições locais do vazamento, nos trabalhos nacionais deve se considerar o alto teor de etanol adicionado à gasolina que, segundo CORSEUIL & MARINS (1997) inibe a biodegradação, além de aumentar a solubilidade e mobilidade dos compostos BTEX dissolvidos na água subterrânea.

4 – DESCRIÇÃO DA ÁREA E HISTÓRICO DA CONTAMINAÇÃO.

A cidade de Atibaia está localizada a cerca de 60 km ao norte da capital paulista, entre os cruzamentos das rodovias Fernão Dias e Dom Pedro I. A área do município é de 478 km² e situa-se entre os paralelos 46°25' e 46°45'S e os meridianos 23°00' e 23°15'W de Greenwich. Enquadra-se no Planalto Atlântico, apresentando clima tropical, temperaturas variando entre 13,6°C e 23,8°C e altitude média de 800m. Segundo CARVALHO *et al* (1975), o clima intermediário entre Cwa e Cwb¹, caracteriza verões chuvosos, invernos secos e verão ameno, devido à altitude. A Figura 4 traz o gráfico de chuva acumulada mensal de 2002 a 2005.



Fonte: Calculado a partir do IAC/[Ciiagro](#), 2005.

Figura 4 – Gráfico de chuva acumulada de Atibaia de 2002 a 2005.

¹ A classificação climática de Köppen traz uma das nomenclaturas mais utilizadas na área, associando médias anuais e mensais de precipitação e temperatura. Os climas existentes são separados em cinco grandes grupos e divididos em tipos e subtipos, representados pelas letras do alfabeto. A primeira letra enquadra o clima em um dos grandes grupos, sendo que C representa o clima temperado. A segunda letra indica nível de precipitação, e w está associado a inverno seco. A terceira letra indica a intensidade de calor no verão, sendo que a sinaliza temperaturas médias acima de 22°C e b, temperaturas médias abaixo de 22°C.

O Auto Posto Gigio está situado na Rodovia Fernão Dias km 30, bairro Tanque, em Atibaia (SP) e entrou em operação em 1990, ocupando uma área de 30.000 m². Os equipamentos instalados no posto eram sete tanques de 15.000 litros de diesel, um tanque de 10.000 litros de gasolina, um tanque de 10.000 litros de álcool, três filtros diesel e oito bombas. O piso da pista de abastecimento, pátio de estacionamento e o piso sobre os tanques eram em concreto armado. Em 1998 foi constatado que estes pavimentos apresentavam várias rachaduras e estavam em mau estado de conservação, podendo ter contribuído para transferir ao subsolo eventuais vazamentos ocorridos na superfície do local.

Em 1998 ocorreu um vazamento de óleo diesel sem registro de volume, detectado pela presença de produto em um poço cacimba de residência da estrada do povoado, Estrada Assembléia de Deus, a jusante do posto.

Em 1999 iniciou-se a remediação da área por bombeamento do aquífero e tratamento com carvão ativado nas estações de tratamento de efluentes. Foram instalados poços de monitoramento (PM) com diâmetro 3" dentro e fora da área do posto e, também poços de bombeamento (PB) com diâmetro 8" nas proximidades dos poços de monitoramento que apresentavam maior espessura de lâmina de hidrocarbonetos. Adicionalmente, foi construída uma trincheira de 2,00m de comprimento por 0,50m de largura e 1,20m de profundidade e no seu interior foi instalado um poço de injeção (PI) com diâmetro de 3", que recebia águas do rebaixamento do aquífero, após serem tratadas.

No final de 2001 foi feita avaliação de risco RBCA (Ação Corretiva Baseada no Risco) para estimar possíveis danos à saúde e ao meio ambiente provocados por vazamento de combustíveis. Foi constatada a presença de produto em fase livre no PM19 (1,5 cm de espessura de hidrocarboneto). Deste estudo foi constatado que as amostras de solo (Anexo 2) não ultrapassaram os VOI (valores orientadores de intervenção) estabelecidos pela CETESB. Entretanto, as amostras de água subterrânea ultrapassaram os limites para benzeno, tolueno, xileno e naftaleno, dentro e fora da área do posto (Anexo 1). Nesta época o consumo médio de combustível no posto era de 1,2 milhão litros/mês, sendo que 80% era de óleo diesel.

No final de 2002, foram encontrados 36 cm de fase livre no PM-21 e presença de película nos poços PM-09 e PB-03. Foi constatado o mau estado de conservação da

rede de poços de monitoramento e que, indevidamente, os poços cacimbas que deveriam estar desativados estavam com fácil acesso de uso pela população local. A CETESB solicitou readequações nas redes de poços e remoção da fase livre encontrada.

Em meados de 2003 entrou em operação um novo sistema de bombeamento da fase livre e foram readequadas as redes de poços, de acordo com a solicitação da CETESB no ano anterior.

Em 2004 foram instalados tanques e bombas novas no posto, construção de canaletas no perímetro da cobertura, caixa separadora de água e óleo para coletar eventuais derramamentos na pista e, construção de pavimento de concreto armado na pista de abastecimento e sobre os tanques novos. A instalação de tanques, bombas e linhas seguiu modelo ecológico com tubulações contínuas e de alta densidade, compartimentos de contenção de derrames e sensores de vazamentos. Posteriormente foram retirados os tanques antigos, sendo que o relatório técnico desta etapa citou um vazamento de linha diesel ocorrido em 2000 e outro vazamento de tanque diesel em 2003. Também foram apresentados resultados das amostras de solo das cavas dos tanques retirados constatando resultados maiores que os de referência para o tolueno, xilenos e naftaleno. A inspeção visual do solo removido não indicou presença de hidrocarbonetos.

No final de 2004, para elaboração desta dissertação, foram realizados levantamentos geofísicos pelos métodos de eletrorresistividade e IP (polarização induzida), em duas linhas a jusante do Posto Gigio.

No início de 2005, continuando os trabalhos de setembro, as duas linhas anteriormente investigadas foram analisadas pelos métodos eletromagnéticos (EM) e georradar (GPR Ground Penetrating Radar).

No primeiro semestre de 2005 foram instalados novos poços de monitoramento, poços de extração multifásica, poços de extração de vapores e um poço de injeção de ar. Os resultados das análises químicas da água subterrânea indicaram valores acima dos VOI nos PM-19 e PM-34 (Anexo 3)

No Anexo 4 são apresentados os VOI para solo e água subterrânea para uso residencial estabelecidos pela CETESB, em 2005.

A Figura 5 traz uma fotografia aérea do Posto Gigio com as duas linhas de investigação, sendo que a Linha 1 é a que se situa ao longo do canteiro central que separa as duas pistas da Rodovia Fernão Dias. A Linha 2 é da Estrada Assembléia de Deus, de terra batida e tráfego de um pequeno povoado local.

A Figura 6 apresenta um croqui de localização da área do Posto Gigio, localização dos poços de monitoramento (PM), poços cacimba (PA), poços de bombeamento (PB), poços de injeção (PI), dos tanques subterrâneos de armazenamento de combustíveis e das linhas onde foram investigados os métodos de eletrorresistividade, polarização induzida, eletromagnético e GPR.



Fonte: Google Earth – acessado em julho de 2006.

Figura 5 – Fotografia aérea do Posto Gigio (Atibaia - SP) com as linhas de investigação.

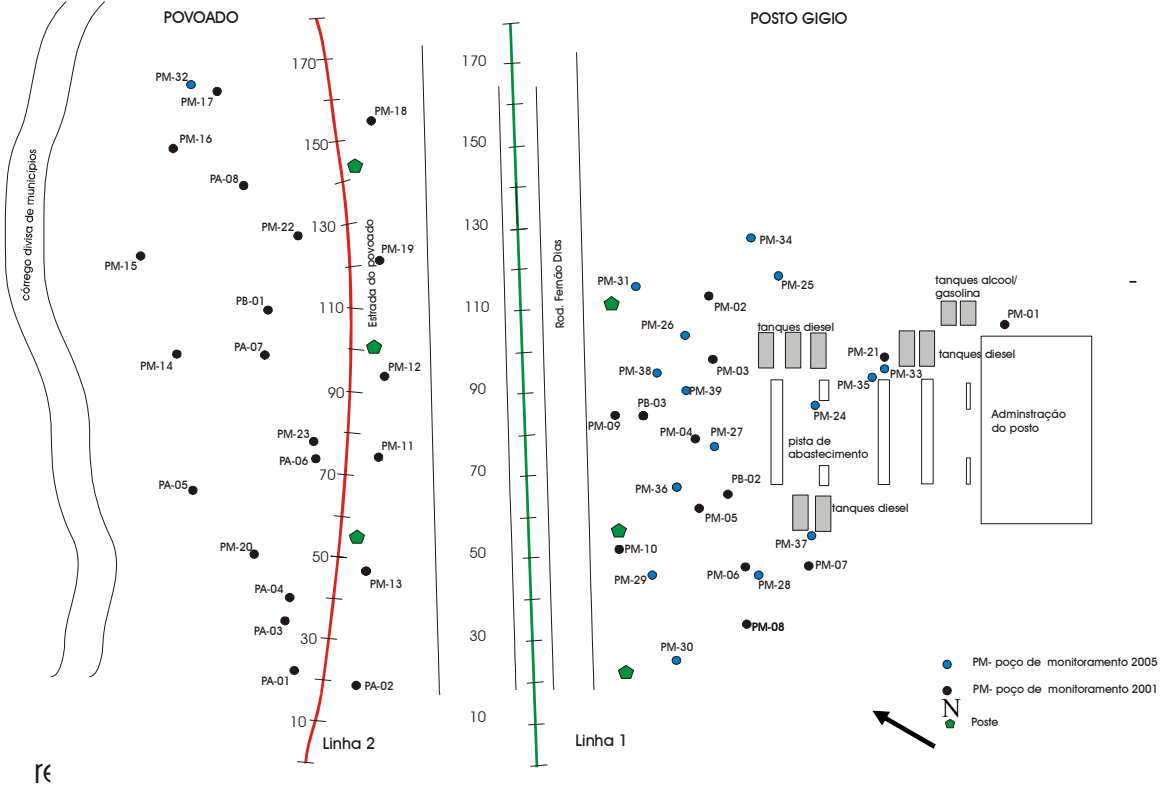


Figura 6 – Croqui e localização da área com poços de monitoramento (PM), poços cacimba (PA) e linhas de investigação.

5 – GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DA ÁREA

A litologia da área é formada pelo maciço granítico de Atibaia e Socorro, Complexo Gnáissico Migmático de Amparo, aluviões e coberturas coluvionares (Figura 7). A região possui três tipos geomorfológicos: relevo montanhoso com altitudes entre 1.000 e 1.420m, colinas mamelonares tipo “mar de morro” com topos arredondados e altitudes entre 800m e 1.000m e as várzeas quaternárias, com altitudes inferiores a 800m e sujeitas a inundações periódicas próximo ao rio Atibaia. (CAVALCANTE *et al.*, 1998).

ALMEIDA & HASUI (1984) indicam que o Grupo Amparo, porção mais representativa da área, é constituído de gnaisses com biotita e/ou hornblenda, bandados e com plagioclásio predominando sobre feldspato potássico e como acessórios granada, diopsídio e sillimanita, além de tipos félsicos e porfiroblásticos. Também são registrados quartzitos micáceos, granatíferos e feldspáticos, quartzo-mica-xistos, xistos com grafita, granada, sillimanita e cianita, assim como mármore, rochas cálcio silicáticas, escarnitos, gonditos, anfíbolitos e metaultrabásitos (dunitos, peridotitos e piroxenitos). O conjunto indica um pacote de sedimentos psamopelíticos e químicos, intercalado de corpos máficos e ultramáficos, transformado em fácies anfíbolito. As rochas foram afetadas por migmatização, originando migmatitos com estruturas estromáticas, flebítica, schollen, surréitica, dobrada, ptigmática, oftálmica e nebulítica. Obtiveram-se idades Rb/Sr isocrônica de 2.085 Ma e K/Ar de 1.918 Ma, indicando a existência do Evento Transamazônico. O Grupo Amparo apresenta-se dobrado intrincadamente, reconhecendo-se três fases, com migmatizações associadas aos eventos Transamazônico, Uruaçuano e Brasileiro.

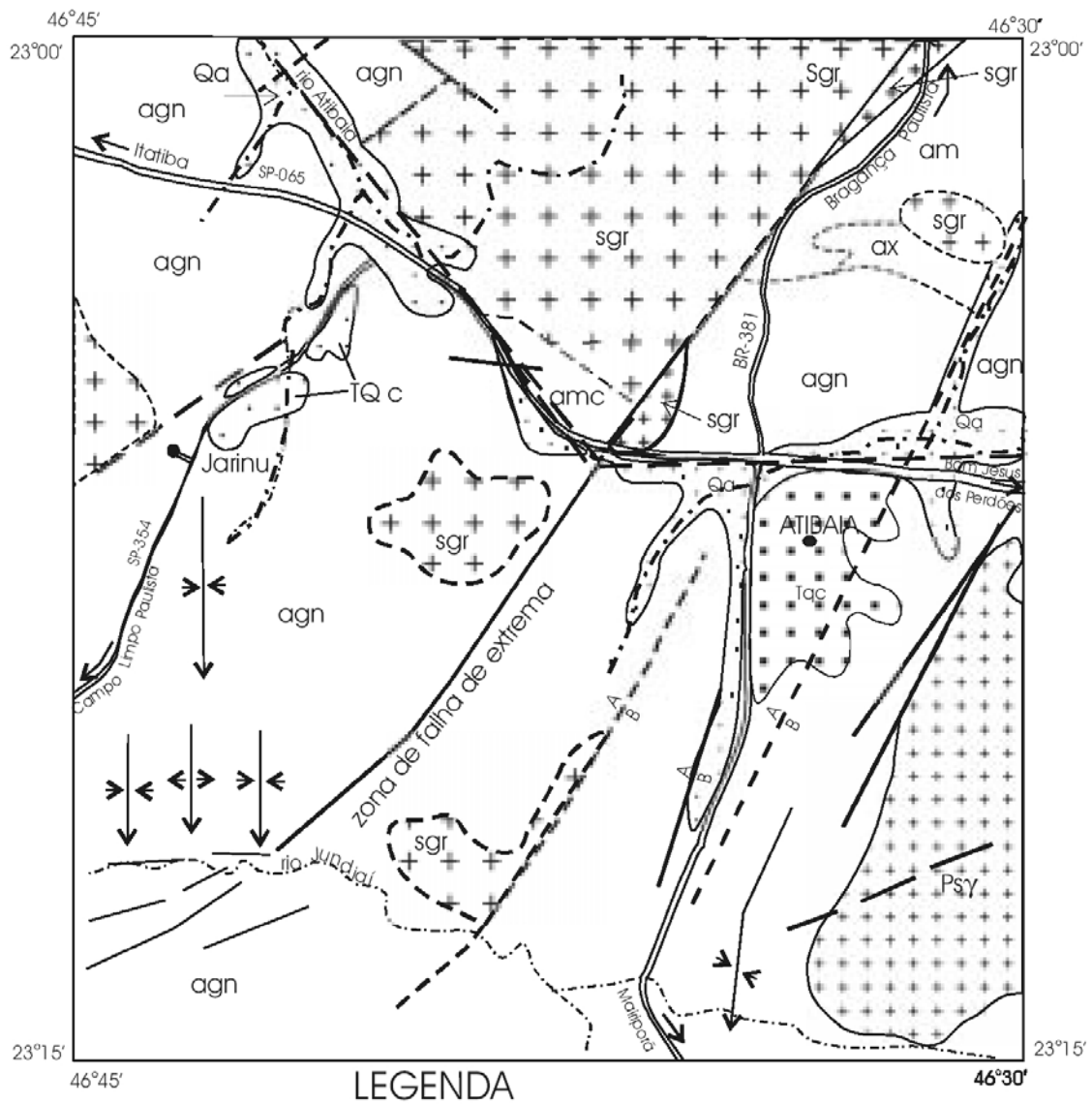
O Auto Posto Gigio situa-se no Bairro Tanque, que segundo CARVALHO *et al.* (1975), é constituído de solos minerais, muito profundos, porosos, ácidos e com pouca diferenciação de horizontes. Segundo o sistema de classificação americana de 1938/49 os solos enquadram-se no Grande Grupo latossolo, o terço médio de encosta tem 16% de declive e a litologia e formação geológica é de granitos e gnaisses do Pré-Cambriano com recobrimentos mais recentes. Também aparece uma seqüência de horizontes A-B-C, com sub-horizontes de transição A3, B1 e B3, o epipedom é úmbrico e está sobreposto a um horizonte óxico. O epipedom úmbrico tem espessura de 140

cm a 200 cm, apresenta textura barrenta e, em profundidade, passa para argila. Na transição do horizonte óxico as cores bruno-avermelhado-escuro passam para vermelho-escuro. Já o horizonte óxico tem espessura maior que 2 metros, textura argilosa, cor passando de vermelha escura a vermelha e estrutura e aspecto maciço-poroso, constituídos de uma massa homogênea composta de grânulos pequenos e pouco coesos.

CAVALCANTE *et al.* (1998) promoveram um estudo hidrogeológico na área de Atibaia, através do cadastramento de poços tubulares e escavados (cacimbas), definindo como zonas aquíferas da região o manto de intemperismo e meio fraturado. O manto de intemperismo, área entre o solo e o leito de rocha, apresenta espessuras entre 20 e 40 metros, camada saturada geralmente menor que 10m, condutividade hidráulica baixa (10^{-4} a 10^{-5} cm/s) e pequena porosidade efetiva (0,1 a 3%). Mais de 90% do nível estático das cacimbas é de 0,4 a 9m, vazão média de $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, capacidade específica de $0,225 (\text{m}^3/\text{h})/\text{m}$, pH entre 4,5 a 6, com águas essencialmente bicarbonatadas cálcicas e condutividade elétrica das águas abaixo de $80 \mu\text{S}/\text{cm}$. O meio fraturado apresenta hidrogeologia heterogênea e predomínio do nível estático similar ao do manto de intemperismo, entre 0,5 a 9m, vazões abaixo de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, capacidade específica de $0,213 (\text{m}^3/\text{h})/\text{m}$, pH entre 5,5 a 8, com águas bicarbonatadas mistas e a condutividade elétrica das águas entre 80 e $210 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Em CETESB (2003), no estudo da geologia local do Posto Gigio, é relatada a presença de uma camada de aterro com espessura de 0,30 a 3,00m, concentrando-se na área próxima aos tanques e nas imediações da Rodovia Fernão Dias. Esta camada tem característica silto-argilosa contendo níveis de cascalho. Abaixo do aterro é identificada uma camada de argila orgânica pertencente à planície aluvial do Córrego da Divisa, afluente do Rio Atibaia. Na seqüência, é caracterizado um perfil de alteração de rocha gnáissica com dois horizontes: o primeiro possui composição argilo-arenosa e espessura variando de 1,30 a 10,00m; o segundo horizonte, subjacente ao anterior, apresenta composição argilo-siltosa e espessura variando entre 1,00 a 7,00m.

A Figura 8 apresenta o Mapa Potenciométrico indicando o fluxo de água subterrânea de Sudeste (SE) para Noroeste (NW). No Anexo 5 são apresentadas as informações dos poços da área.



Fonte: CAVALCANTE *et al.*, 1998.

Figura 7 – Mapa esquemático da geologia de Atibaia.

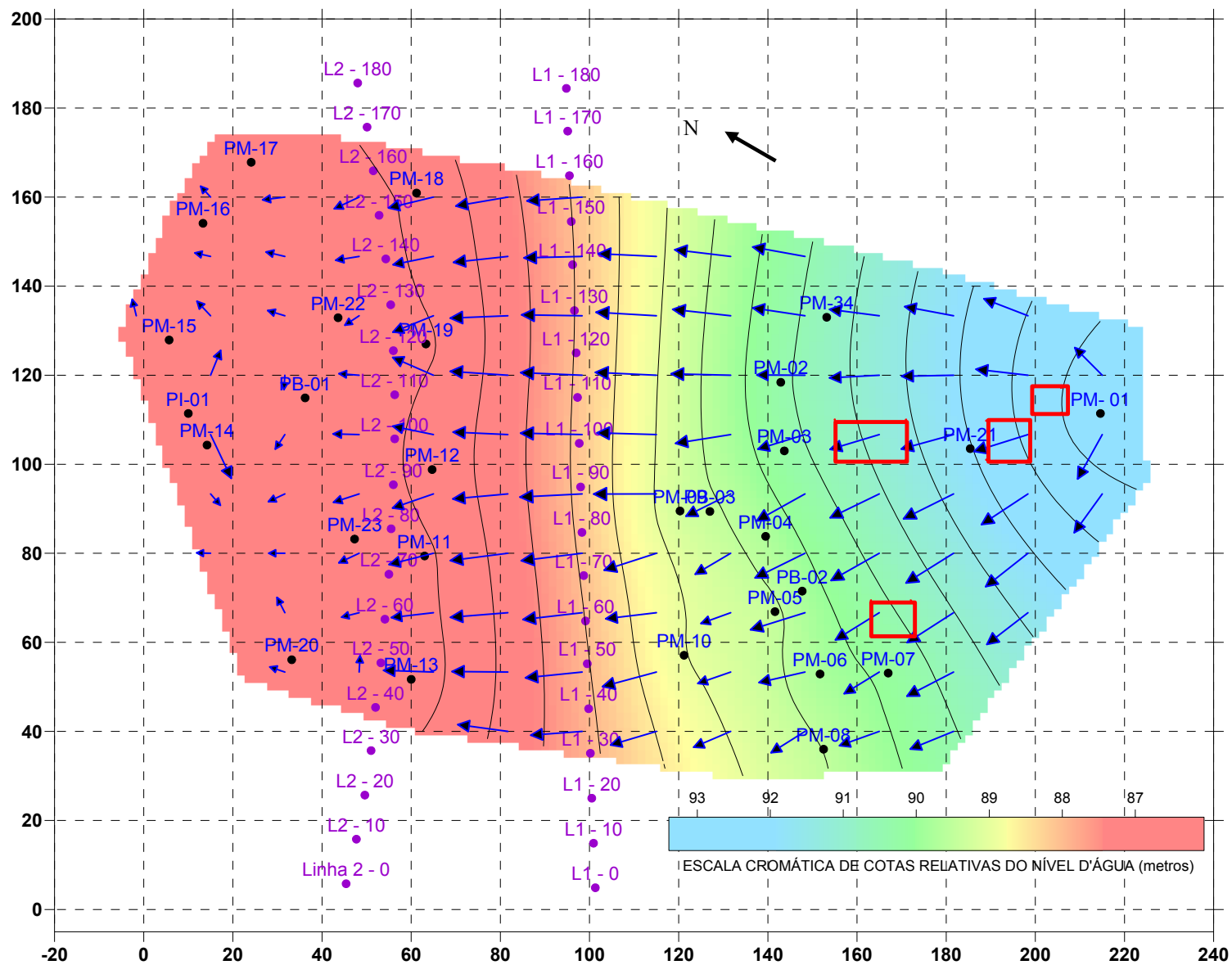


Figura 8 – Mapa potenciométrico da área.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 – O Método da Eletrorresistividade

No método da eletrorresistividade são utilizados quatro eletrodos em contato galvânico com o solo, sendo um par de eletrodos para emissão de corrente elétrica através de uma fonte artificial e o outro par usado para as medidas de diferença de potencial causado pela passagem de corrente. Conhecendo-se a corrente elétrica, determinada por um amperímetro, e a diferença de potencial medida pelo voltímetro, é possível calcular as resistividades correspondentes em subsuperfície.

A Figura 9 traz o conceito básico da medição da resistividade, com as linhas de fluxo de corrente fluindo entre os eletrodos **A** e **B** e as linhas equipotenciais posicionadas perpendicularmente àquelas (BENSON & NOEL 1984).

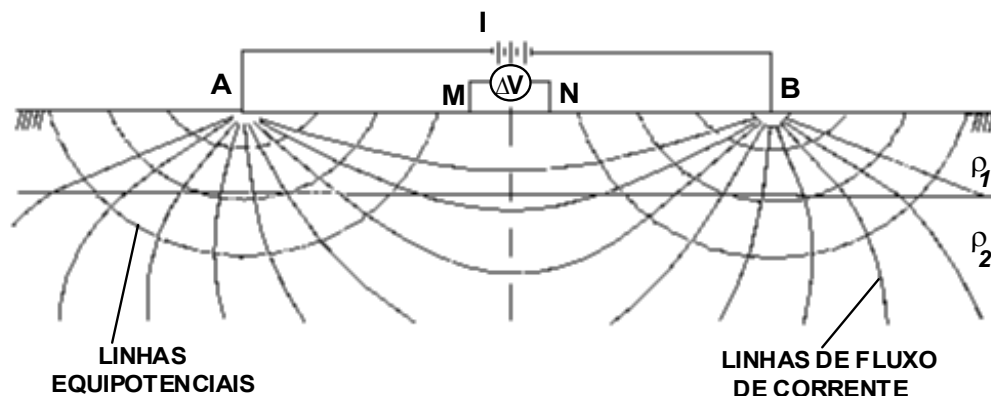


Figura 9 – Princípio do método da eletrorresistividade.

A propriedade física medida pelo método é a resistividade elétrica, inverso da condutividade, e é a resistência oferecida pelo material à passagem de corrente, quando submetido a uma tensão elétrica. Em geofísica, a condução de corrente elétrica acontece predominantemente através de condução eletrolítica, com o fluxo de corrente passando através de íons, sendo que o meio condutor costuma ser uma solução de água e sais distribuídos nos poros das rochas.

A resistividade das rochas é uma propriedade muito variável, indo de $10^{-6}\Omega\text{m}$ para alguns materiais, como a grafita, a mais de $10^{12}\Omega\text{m}$ para rochas quartzíticas secas. A

maioria das rochas é isolante quando seca, porém, como na natureza quase sempre existe espaço intersticial preenchido com água e sais dissolvidos, acabam adquirindo algum caráter condutivo. Em algumas rochas como basalto e granito, a condutividade varia intensamente de acordo com o grau de interconectividade dos poros, ou da ausência deles, passando de milhares de Ωm nas compactas a poucos Ωm em rochas porosas (PARASNIS, 1986).

A Tabela 2 traz, apenas para referência, alguns valores de resistividade de materiais, porém ressalta-se que a resistividade depende do teor de água e íons dissolvidos, da porosidade e permeabilidade da rocha.

Tabela 2 – Resistividade elétrica de alguns materiais.

Resistividade das águas (em ohms x m)	
Água do solo	1 a 100
Água da chuva	30 a 1000
Água do mar	0,2
Gelo	105 a 108
Resistividade das Litologias, abaixo do nível de água (ohms x m)	
Ígneas e metamórficas	100 a 10.000
Sedimentos consolidados	10 a 1000
Sedimentos inconsolidados	1 a 100
Resistividade dos Eletrólitos em função do teor de sais (em ohms x m)	
0,005 g/l	1050
0,1 g/l	110
0,5 g/l	12

Fonte: GALLAS, 2000.

A resistividade aparente ρ_a é um conceito importante na prospecção geofísica. Supondo que o terreno seja homogêneo e isotrópico, esta resistividade será constante para quaisquer disposições de eletrodos que sejam empregadas nas medições. Sabe-se, no entanto, que os substratos não são homogêneos e nem isotrópicos. A resistividade é obtida a partir de medidas realizadas sobre um meio heterogêneo aplicando-se a expressão válida para meios homogêneos e é denominada resistividade aparente. A equação 1, considera dois eletrodos de corrente (**A** e **B**) e dois pontos de

medidas do potencial **U** (**M** e **N**). Considera-se o potencial em **B** negativo, supondo-se que a corrente entra em **A** e sai em **B**.

$$\rho_a = \left(\frac{U_M - U_N}{I} \right) \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} = K \frac{\Delta U}{I} \quad (\text{eq. 1})$$

sendo **K**, o fator geométrico que depende das distâncias entre os eletrodos **A, B, M** e **N**.

6.1.1 Arranjos de eletrodos

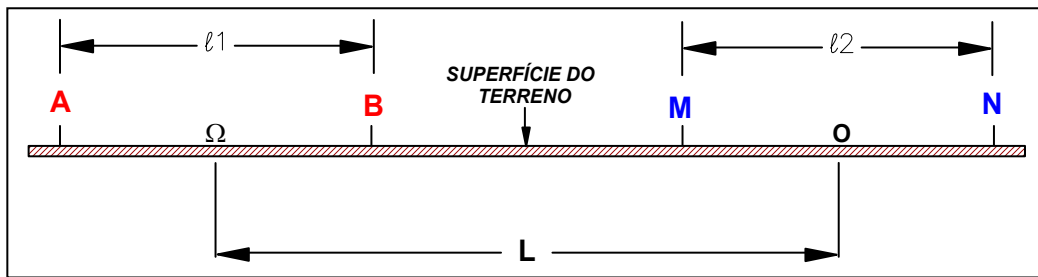
No método de eletrorresistividade, podem ser utilizados diferentes tipos de arranjos dos eletrodos e a opção deve ser baseada no objetivo a ser atingido e nas características do local de estudo, podendo ser estudadas heterogeneidades verticais e horizontais. Para as variações verticais, a técnica mais adequada é a da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), enquanto que para as laterais, a do caminhamento elétrico. Dos arranjos mais utilizados, destacam-se dipolo-dipolo, pólo-dipolo, gradiente, Wenner, Schlumberger e “mise-à-la-masse” (GALLAS, 2000).

Neste trabalho, o arranjo empregado foi o dipolo-dipolo, descrito a seguir.

6.1.2 Arranjo dipolo-dipolo

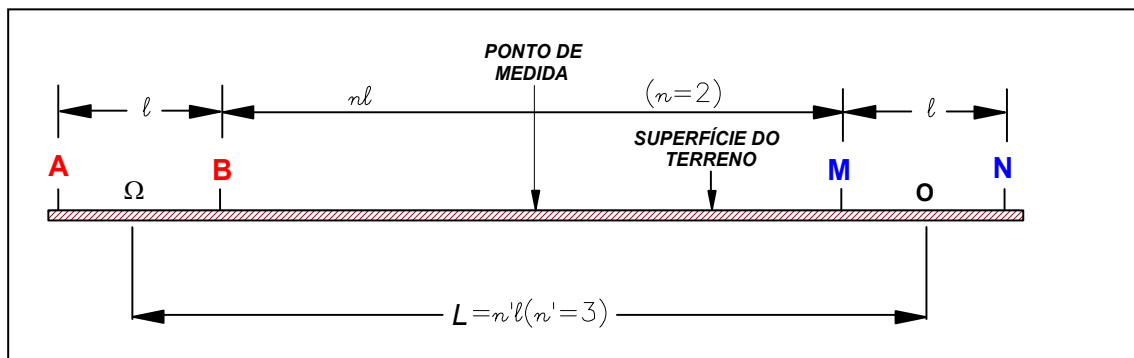
O arranjo dipolo-dipolo é o de mais ampla utilização nos levantamentos geofísicos de eletrorresistividade e também IP, uma vez que os arranjos usados para este método são idênticos aos da eletrorresistividade. Os eletrodos **A, B** (de emissão de corrente) e **M, N** (de diferença de potencial) são posicionados no mesmo alinhamento, sendo $l_1 = \mathbf{AB}$; $l_2 = \mathbf{MN}$ e $\mathbf{L} = \mathbf{OQ}$, conforme demonstrado na Figura 10.a.

O ponto médio do dipolo **AB** é **Q** e **O** é o ponto médio do dipolo **MN**. Normalmente se adota a mesma abertura entre os eletrodos sendo que $l_1 = l_2 = l$ e também $\mathbf{BM} = \mathbf{OQ} - l = \mathbf{L} - l = n l$, onde **n** é um número igual ou maior que 1. A Figura 10.b mostra a disposição dos eletrodos com **n = 2**.



Fonte: GALLAS, 2000.

Figura 10.a – Arranjo dipolo – dipolo (a).

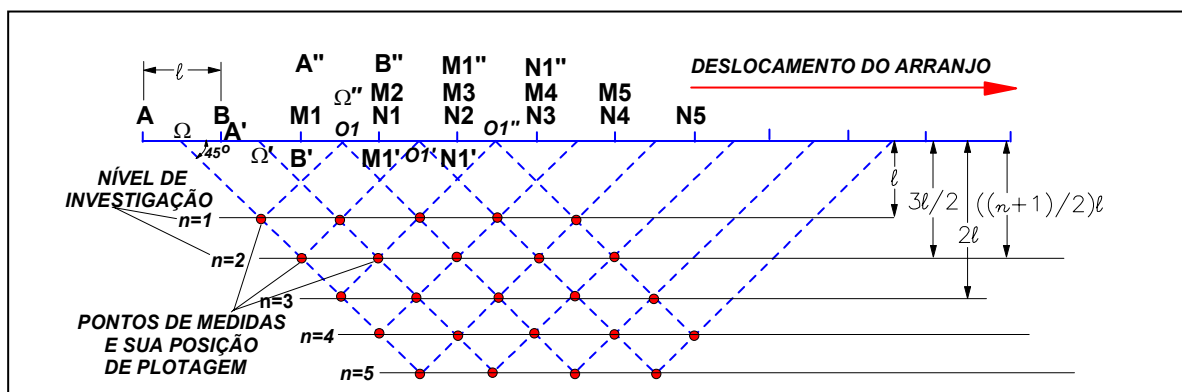


Fonte: GALLAS, 2000.

Figura 10.b – Arranjo dipolo – dipolo (b).

Com a simetria do arranjo nota-se que o ponto médio do sistema é o ponto médio de ΩO , que também é o centro de BM . Com o aumento de L , amplia-se a profundidade de investigação. Como normalmente se investiga vários níveis de profundidade (diferentes valores de n) mantêm-se os eletrodos de corrente AB em uma posição fixa e deslocam-se os eletrodos de potencial MN ao longo do perfil em distâncias iguais a ℓ , de maneira que M_1N_1 ($n = 1$); M_2N_2 ($n = 2$); M_3N_3 ($n = 3$) e assim sucessivamente. Posteriormente, os dois eletrodos de corrente AB é que se deslocam a uma distância ℓ e novamente os eletrodos de potencial caminham ao longo do perfil ocupando as posições $M'_1N'_1$; $M'_2N'_2$ etc. Continuamente, efetuam-se outros deslocamentos seqüenciais de todo o conjunto $M''_1N''_1$; $M''_2N''_2$ percorrendo todo alinhamento a ser investigado (Figura 11).

Com a obtenção dos dados de campo pelos ensaios de eletrorresistividade (e também IP, quando é o caso), são calculados pontos para se traçar as curvas de isovalores. Normalmente, no caso de IP, as medidas são apresentadas sem correções e, as de resistividade, são plotadas após o cálculo da resistividade aparente ρ_a (conforme já descrito acima). Os pontos de plotagem são obtidos através da intersecção de linhas a 45° partindo do ponto O e Ω de cada dipolo, indicando a profundidade teórica atingida pelo ponto, sendo **profundidade = $(n + 1) \ell/2$** com $n = 1; 2; 3$ etc.



Fonte: GALLAS, 2000.

Figura 11 – Esquema de arranjo dipolo – dipolo.

A eletrorresistividade pode investigar grandes profundidades, podendo ser superior a 100m, dependendo da abertura e arranjo dos eletrodos, da geologia do local e da corrente elétrica injetada.

Além da utilização para caracterização geológica e hidrogeológica, identificação de fraturas, definição de nível de água subterrânea e outros, a eletrorresistividade tem apresentado diversas aplicações na área ambiental, como determinação de áreas de disposição de resíduos, mapeamento de plumas, determinação preferencial de fluxos de água etc. (BENSON & NOEL 1984; EPA 1997; GALLAS *et al.* 2003; VEGA *et al.* 2003).

O método de eletrorresistividade pode sofrer interferências devidas ao mau contato entre os eletrodos e o solo, geologia do local como argilas condutivas, correntes elétricas espúrias, obras antrópicas, além de interferências devidas a tubulações, estruturas metálicas e de concreto. Vale lembrar também, que os outros métodos

empregados (EM e GPR) também são afetados por estes mesmos motivos e de forma ainda mais intensa.

Neste trabalho foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo, espaçamento entre eletrodos de 10m, cinco níveis de investigação em dois perfis de 180m de extensão.

Para os ensaios de eletrorresistividade e polarização induzida foram utilizados o transmissor ELPP 671, conversor AE 631 de 1000W, conversor AD 631 de 200W (CGG, Compagnie Générale de Géophysique, França) e receptor IPR-10A da Scintrex (Canadá).

Os dados obtidos, tanto de resistividade quanto de IP, foram processados através dos programas RES2DINV e Surfer 8, da ABEM Instruments (1988) e Golden Software, respectivamente. O Surfer 8 é um programa para interpolação de dados, enquanto o RES2DINV é um programa de inversão para resistividade e polarização induzida (IP).

Os resultados da inversão pelo RES2DINV foram exportados na forma de arquivos XYZ e interpolados pelo Surfer 8 (krigagem), visando uma apresentação de melhor qualidade dos mesmos. O RES2DINV adota uma técnica rápida e eficiente para inversão de dados de resistividade e IP que foi desenvolvida por LOKE & BARKER (1996a, 1996b) e de GROOT & CONSTABLE (1990), que baseia-se no método dos mínimos quadrados e “suavização restringida” (smoothness-constrained). Teoricamente, produz um modelo de superfície 2-D isento das distorções na pseudo-seção de resistividade aparente originadas pela geometria do arranjo eletródico usado.

6.2 – O Método de Polarização Induzida - IP

A polarização induzida (IP) é um fenômeno elétrico provocado pela transmissão de corrente no solo, observado como uma resposta defasada de voltagem nos materiais terrestres. Tem importância prática como método de prospecção de depósitos minerais ou ainda restrita em casos ambientais. Como medida geofísica, a polarização induzida refere-se a uma ação de bloqueio resistivo ou de polarização elétrica nos materiais terrestres, com ênfase maior do processo nos poros preenchidos por fluidos nas imediações dos minerais metálicos. Portanto, o efeito IP é mais intenso nas rochas que contêm minerais metálicos.

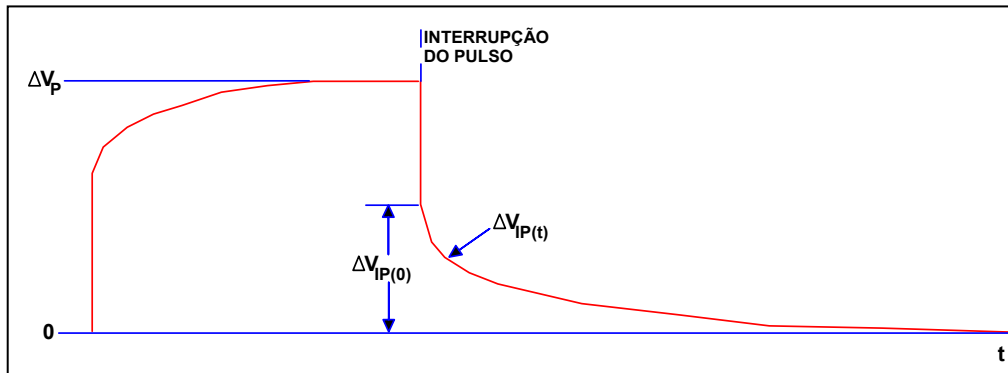
Não se conhece perfeitamente os fenômenos físico-químicos que explicam a polarização induzida, sendo que uma possível analogia seria a de que partículas polarizáveis (sulfetos, argilas) teriam o comportamento de minúsculos condensadores que se carregariam durante a emissão de corrente elétrica e se descarregariam após sua interrupção. Desta forma, o efeito IP refletiria um efeito capacitivo do subsolo.

Este método é muito difundido na prospecção mineral, particularmente na detecção de jazidas de sulfetos disseminados. A resposta do IP aumenta de acordo com a quantidade de mineralização, também apresentando uma forte resposta na detecção de corpos de sulfetos maciços. Entretanto, outros métodos geofísicos podem detectar sulfetos maciços com custo menor que o IP, por isso ele encontra melhor aplicação nos sulfetos disseminados (GALLAS, 2000).

Além da boa resposta da polarização induzida em minerais metálicos, a detecção de argila também é feita pelo método IP (PARASNIS, 1986). O fenômeno IP pode ser observado tanto no domínio do tempo quanto da frequência. O descrito a seguir refere-se à técnica do domínio do tempo, que foi a empregada no presente trabalho.

6.2.1 - O IP no Domínio do Tempo

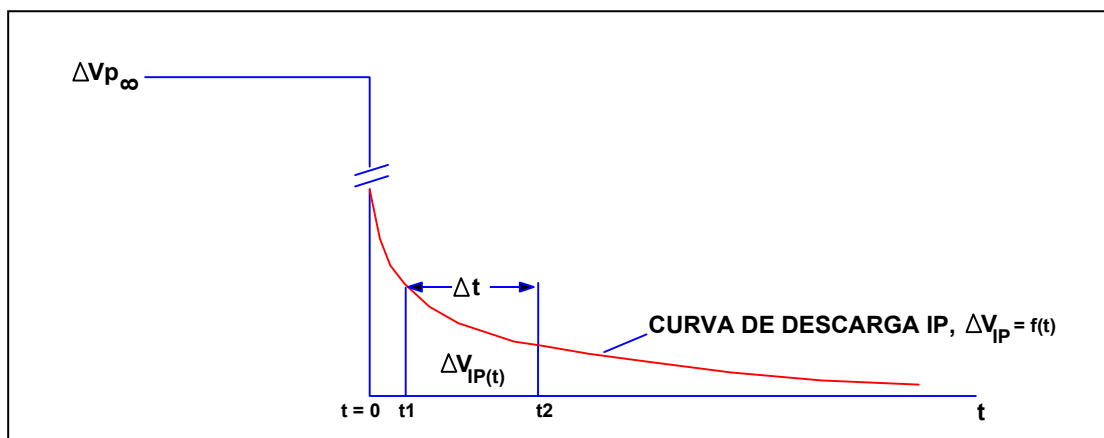
Quando é estabelecida uma diferença de potencial ΔU , devida à passagem de corrente pelo solo, esta diferença de potencial não se estabelece nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos, mas descreve uma curva $\Delta U_{IP} = f(t)$, a qual liga a assíntota ΔU_P em regime estacionário, com a assíntota zero após o corte da corrente (Figura 12). Este fenômeno é chamado “Polarização Induzida” (BERTIN & LOEB, 1976).



Fonte: GALLAS, 2000.

Figura 12 – Curva de descarga IP.

Em síntese, pode-se descrever o fenômeno IP no domínio do tempo conforme a Figura 13.



Fonte: GALLAS, 2000.

Figura 13 – Curva de descarga IP em função do tempo.

A quantidade que caracteriza o fenômeno IP é a área sob a curva de descarga, inclusive a parte assintótica que tende a zero. Na prática, por razões de instrumentação e rapidez nas medidas, mede-se uma área sob a curva de descarga através da integração da tensão transiente no intervalo de uma janela Δt , de t_1 a t_2 . A quantidade medida, chamada de cargabilidade aparente M , é frequentemente expressa em milivolts/Volt (mV/V) ou, mais precisamente, em milissegundos. Normalmente, a

área integrada sob a curva de decaimento é normalizada com relação à voltagem primária ΔV_p , ficando:

$$M = \frac{M_{t_1, t_2}}{\Delta V_p} = \frac{1}{\Delta V_p} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IP(t)} dt \quad (\text{eq. 2})$$

As técnicas e arranjos usados na polarização induzida costumam ser os mesmos usados na eletrorresistividade. Geralmente os equipamentos usados para aquisição IP também realizam medidas de resistividade, mas a recíproca não é verdadeira. (GALLAS *et al.*, 2001).

As possibilidades de emprego do IP são inúmeras, além da consagrada aplicação em mineralização, GALLAS (2000) cita algumas utilizações do ensaio IP em conjunto com outros métodos geofísicos: delimitação de área desmoronada de túnel em metrópole, investigações de corpos de barragens, detecção de anomalias em terrenos cársticos, investigação de chorume em aterros sanitários e lixões, diferenciação entre águas salinizadas e doces, identificação de pacotes de argila etc.

São consideradas duas possíveis origens para a polarização induzida: polarização metálica e polarização de membrana.

6.2.2 Polarização Metálica ou Eletrônica

A polarização metálica, eletrônica ou de eletrodo (sendo eletrodo o grão mineral metálico) é aquela que acontece em metais ou minerais metálicos em que o processo de condução da corrente dá-se através de elétrons.

A polarização metálica aparece com maior intensidade em corpos minerais metálicos, onde acontece a passagem de corrente eletrônica (na superfície do mineral metálico) para a corrente iônica (nos íons do eletrólito) e vice versa. A situação fica similar a dipolos elétricos e, quando a corrente é interrompida, a distribuição dos íons tende a voltar ao equilíbrio gerando uma despolarização – curva de descarga - que caracteriza o efeito IP.

6.2.3 Polarização de Membrana, Não-metálica ou Eletrolítica

A polarização de membrana verifica-se no subsolo onde partículas de argilo-minerais bloqueiam parcialmente os poros por onde percolam as soluções iônicas. A nuvem difusa de cátions (dupla camada) nas vizinhanças da superfície externa da partícula é característica de sistemas argila-eletrólito. Quando um potencial elétrico é aplicado, os transportadores de cargas positivas passam através da nuvem de cátions, mas os transportadores de cargas negativas acumulam-se, formando-se uma membrana seletiva de íons. Conseqüentemente, ocorrerão zonas de concentração de íons, formando-se membranas de polarização (SUMNER, 1976; BERTIN & LOEB, 1976).

A maior parte das cargas adsorvidas e adjacentes à membrana está localizada a uma distância **d** a partir de sua superfície (GRAHAME, 1947 apud. GALLAS, 2000).

$$d = \frac{K_e kT}{(2ne^2v^2)^{1/2}} \quad (\text{eq.3})$$

Onde:

d = espessura da dupla camada

n = concentração normal de íons no eletrólito

v = valência dos íons

e = carga elementar

K_e = permissividade dielétrica relativa do meio fluido

k = constante de Boltzman ($1,38054 \times 10^{-16}$ Erg/°K)

T = temperatura

Portanto, o fenômeno IP intensifica-se à medida que a distância **d** aumenta, isto é:

$$IP \propto d \quad (\text{eq.4})$$

6.2.4 – Aquisição de Campo

As fotos a seguir ilustram a aquisição de dados IP-resistividade, particularmente a linha 1 (canteiro entre as pistas da rodovia Fernão Dias), uma vista parcial do Auto Posto Gigio e da área contaminada e detalhe com o receptor IPR-10A.



Foto 1 – Vista da Linha 1, canteiro entre pistas da rodovia.



Foto 2 – Aquisição IP - resistividade e vista parcial do posto Gigio.



Foto 3 – Aquisição IP - resistividade com IPR-10A.

6.3 - O Método Georradar – GPR

O GPR é um método geofísico desenvolvido há mais de 30 anos, que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência, geralmente na faixa entre 10 MHz e 1.000 MHz. Embora a sigla GPR (*ground penetrating radar*) seja muito utilizada, o ensaio também é conhecido com georradar, radar de penetração etc.

Uma das razões da popularidade do GPR é seu formato gráfico contínuo e de alta resolução, pois normalmente os dados do radar são interpretados pelo aspecto visual do gráfico impresso, permitindo rapidez na verificação das anomalias encontradas (BENSON & NOEL 1984). O GPR costuma ser citado como um dos métodos geofísicos que apresenta melhor resolução em subsuperfície, sendo muito apropriado para investigações rasas.

OLHOEFT (1998) salienta que as propriedades elétricas dos materiais são divididas em duas partes: transporte das cargas elétricas representado pela condutividade e, armazenamento das cargas elétricas descrito pela polarização. Como o GPR atua com altas frequências, os efeitos da polarização predominam em relação à condutividade.

Quando se aplica um campo elétrico externo em um material, as cargas se movimentam separando-se até uma distância suficiente para criarem um campo elétrico interno que contrabalanceie o campo externo aplicado. Esta separação das cargas em determinada distância é chamado de polarização, onde ocorre um armazenamento de energia, sendo que a capacidade do material de sustentar este armazenamento é chamada de permissividade dielétrica ϵ (OLHOEFT, 1998). Como a permissividade dielétrica do meio ϵ é um valor muito pequeno, costuma ser utilizada a constante dielétrica K , que é determinada através da equação 3, representando a correlação entre a permissividade dielétrica ϵ do meio e a permissividade dielétrica do vácuo ϵ_0 :

$$\epsilon = K * \epsilon_0 \quad (\text{eq.3})$$

ORELLANA (1972) ressalta que não se conhece nenhum valor que apresente permissividade dielétrica menor que a do vácuo, que mede $\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$. A

constante dielétrica das rochas é função dos seus constituintes, sendo que a presença de água, que quase sempre possui íons dissolvidos, afeta consideravelmente esta característica. Estudos mostram que a presença de água pode aumentar cerca de dez vezes a constante dielétrica em relação à mesma rocha seca; se a água tiver salinidade, a constante dielétrica ainda poderá ser maior.

A propagação da onda eletromagnética de alta frequência depende da sua velocidade v e atenuação α durante seu trajeto. O principal fator que influencia a velocidade é a permissividade elétrica do material, que pode ser determinada pela equação 4:

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (\text{eq. 4})$$

onde c é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo.

A atenuação α do pulso relaciona-se diretamente com a condutividade elétrica do material, sendo determinada pela equação 5:

$$\alpha = 1,69 \frac{\sigma}{\sqrt{K}} \quad (\text{eq. 5})$$

onde σ é a condutividade elétrica, em mS/m.

Apenas como referência e para facilitar a interpretação dos resultados desta dissertação, a Tabela 3 apresenta valores típicos da constante dielétrica K , velocidade v e condutividade elétrica σ de alguns materiais.

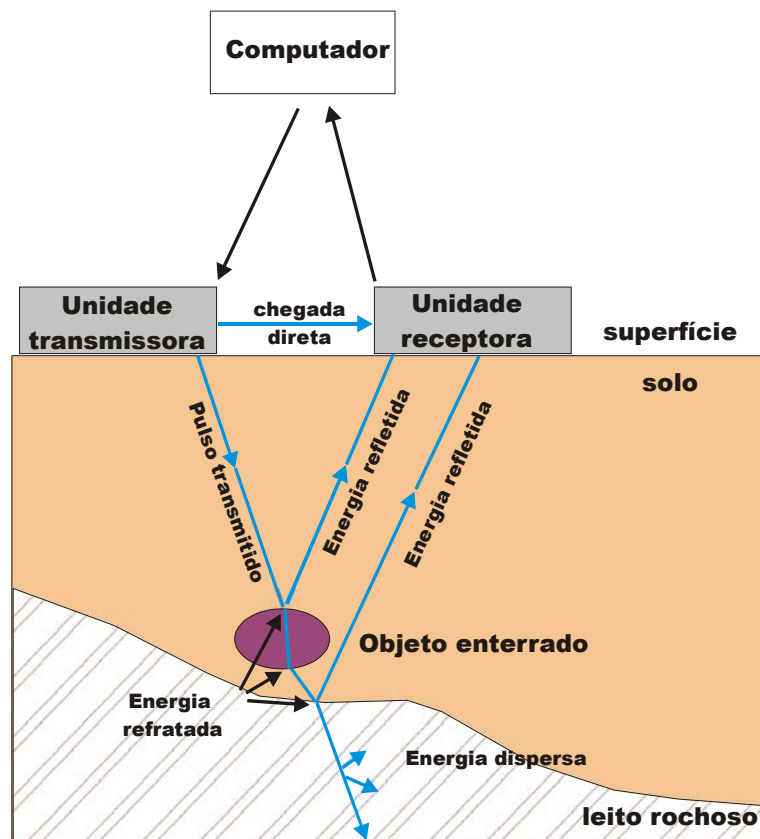
Tabela 3 – Propriedades eletromagnéticas de alguns materiais.

Material	Constante Dielétrica, K	Velocidade Pulso, V (m/ns)	Condutividade, σ (mS/m)
Ar	1	0,3	0
Água doce	81	0,033	0,10-30
Água do mar	70	0,033	400
Areia seca	4-6	0,15-0,12	0,0001-1
Areia saturada	25	0,0055	0,1-1
Silte saturado	10	0,095	1-10
Argila saturada	8-12	0,106-0,087	100-1000
Terra costeira seca	10	0,095	2
Gelo água doce	4	0,15	0,1-10
Solo gelado	4-8	0,15-0,106	0,01-10
Granito seco	5	0,134	0,00001
Limestone (dry)	7-9	0,113-0,1	0,000001
Dolomita	6-8	0,122-0,106	
Quartzo	4	0,15	
Carvão	4-5	0,15-0,134	
Concreto	5-10	0,134-0,095	
Asfalto	3-5	0,173-0,134	
Gelo do mar	4-12	0,15-0,087	

Fonte: Modificado de EPA 2003, acessado http://fate.cluin.org/GPR_main.asp

#table em jun 2005.

O aparelho GPR é constituído por unidades transmissora e receptora, unidade de controle e computador portátil (*notebook*). As antenas transmissora e receptora posicionam-se dentro de suas respectivas unidades que são formadas por módulos eletrônicos conectados à unidade de controle por cabos de fibras óticas. O computador conecta-se ao controle por cabo de comunicação paralelo. A onda eletromagnética de alta frequência é emitida pela antena transmissora para a subsuperfície sofrendo reflexões, refrações e dispersões, dependendo das propriedades elétricas do meio. A antena receptora captura o sinal recebido, que é amplificado, digitalizado e armazenado para análise posterior (Figura 14).



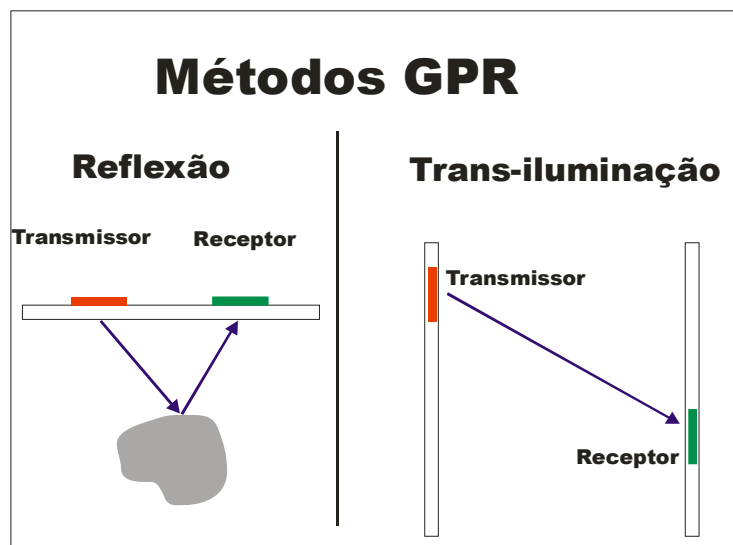
Fonte: Modificado de EPA 2003, acessado http://fate.clu-in.org/GPR_main.asp#table em jun 2005.

Figura 14 – Esquema de funcionamento do GPR.

A relação entre a velocidade da onda e as propriedades do material são fundamentos básicos para o uso do GPR, pois como os materiais têm propriedades elétricas diferentes, as velocidades também são diferentes. Se um sinal for passado através de dois materiais com diferentes propriedades elétricas, eles chegarão a tempos diferentes para as mesmas distâncias (DANIELS, 2000). O intervalo de tempo que a onda leva desde a sua transmissão até a recepção é chamado de tempo de trânsito e a unidade de medida deste tempo é o nanosegundo (ns), sendo que $1\text{ns} = 10^{-9}\text{s}$. Este tempo depende das propriedades dielétricas do meio onde o pulso caminha e o teor de umidade é um fator relevante, pois a água tem um valor dielétrico alto comparado com a rocha e o solo comum.

A maneira mais usual de aquisição de dados GPR é através do modo reflexão, em que se mantém a distância constante entre a bobina transmissora e a receptora (Common

Offset). Neste caso, a onda do radar é transmitida, recebida e gravada em cada tempo que a antena se movimenta em distâncias fixas ao longo do perfil a ser investigado. Outro modo de se usar o equipamento é por transiluminação, que é o modo em que o receptor e o transmissor do sinal são posicionados em lados opostos do meio a ser investigado (Figura 15). Nesta dissertação foi utilizado o modo reflexão para coleta de dados.



Fonte: Modificado de EPA 2003, acessado http://fate.clu-in.org/GPR_main.asp#table em jun 2005.

Figura 15 – Modos de operação do GPR.

Uma vantagem do GPR em relação a outros métodos é a utilização de alta frequência, gerando dados de boa resolução. Entretanto, deve-se atentar para a escolha correta da frequência de operação, de maneira a obter-se a melhor relação entre a penetração do sinal e a resolução do alvo que se deseja estudar. Altas frequências implicam em alta resolução e baixa profundidade de penetração. Baixas frequências, por sua vez, propiciam baixas resoluções e maiores profundidades de penetração.

Embora o GPR seja um método conhecido para investigações rasas até 10m, OLHOEFT (1999) indica que a profundidade de investigação do GPR, na faixa de 1 a 1.000 MHz, varia de 5.400 m no Pólo Antártico a menos de 1 m em água do mar e

argila com montmorilonita. Porém, na maioria dos solos e rochas a penetração é menor que 10 m.

Geralmente os melhores resultados são encontrados em áreas secas, rochosas e arenosas; enquanto os menos expressivos são obtidos em áreas úmidas, argilosas e em solos condutivos (BENSON & NOEL 1984). Devido ao bom desempenho em subsuperfícies resistivas, o GPR foi usado durante muitos anos em áreas com solos congelados e no mapeamento de espessuras de gelo no Ártico e na Antártida.

Um dos fatores que limitam a profundidade de penetração do georradar é a atenuação das ondas eletromagnéticas nos materiais terrestres, sendo que a atenuação é resultado da conversão de energia eletromagnética em energia térmica devido a altas condutividades do solo, rocha ou fluidos (EPA 2003). Desta maneira, altas condutividades devido a sais dissolvidos ou a contaminações provocarão fortes atenuações no equipamento, assim como um aumento no teor de umidade de solos e rochas secas, e aumento no teor de argila, provocará maior condutividade (BENSON & NOEL 1984).

O método é sensível a ruídos causados por veículos, construções, cercas, matacões, raízes de árvores etc., porém, antenas blindadas diminuem algumas interferências. Por outro lado, transmissões eletromagnéticas de aparelhos celulares, rádio, televisões etc. também podem causar ruído nas gravações do aparelho.

O GPR tem sido utilizado na localização de tanques e objetos enterrados, localização de galerias subterrâneas, mapeamento de aterros sanitários, determinação da profundidade do leito rochoso, profundidade do nível de água, espessura de camadas de solo, localização de cavidades em subsuperfície, determinação de contaminações orgânicas e inorgânicas etc. Além disto, também pode ser aplicado na exploração lunar e planetária, terremotos, desmoronamentos, estudos arqueológicos, investigações de perícia, estudos em rodovias e estradas de ferro etc. (OLHOEFT, 1999).

Nesta dissertação foi utilizado o equipamento RAMAC produzido pela MÅLA GeoScience e antenas de 100 MHz, com medidas espaçadas a cada 0,25m. Na interpretação das seções, para a conversão da seção de tempo para profundidade (estimativa das profundidades investigadas), assumiu-se uma velocidade de 0,08 m/ns,

compatível com a constituição do solo local, que é produto de alteração de rochas graníticas.

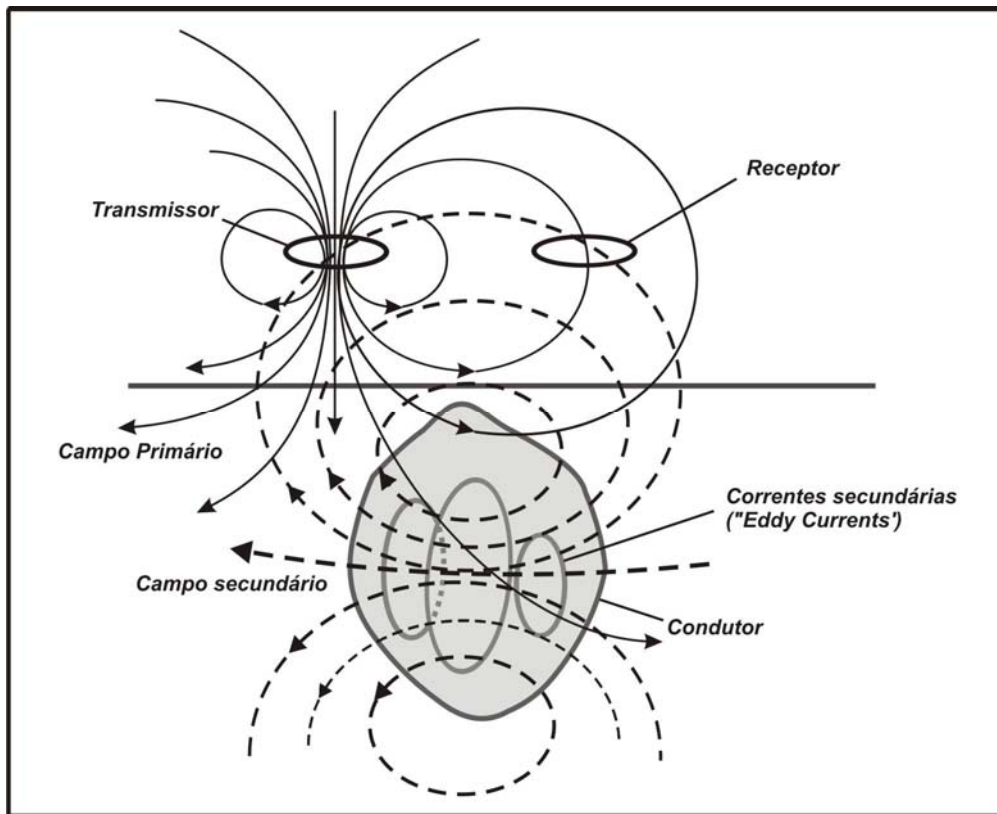
O software selecionado para o processamento dos dados foi o RADPRO (Radar Processing Software) versão 2.25 (1996). Os dados de campo foram tratados adotando-se os seguintes parâmetros: correção do tempo-zero, filtragem temporal passa banda trapezoidal (para eliminar parte dos sinais de muito alta e muito baixa frequência) e ganho constante para melhor realce do sinal.

6.4 - O Método Eletromagnético – EM

Nos métodos eletromagnéticos ocorre a propagação de campos magnéticos gerados por correntes alternadas. O termo eletromagnético algumas vezes inclui outros métodos geofísicos que também usam princípios eletromagnéticos, como o GPR e detector de metais. Porém, nesta dissertação, a denominação será usada apenas para ensaios de baixa frequência, que se alinha ao uso tradicional do termo na indústria geofísica.

Nos ensaios de baixa frequência, até 25 KHz, predominam o efeito de condutividade elétrica. Nos ensaios que usam frequências elevadas, como o georradar que opera na faixa de 10 a 1000 MHz, as propriedades dielétricas do meio são predominantes. A condutividade elétrica da subsuperfície depende do tipo de solo e rocha, porosidade, permeabilidade, características da água subterrânea, fraturas etc. Depósitos localizados de argila, areia, sais e contaminações, também afetam a condutividade do local.

Quando se injeta corrente elétrica alternada em um fio, é gerado um campo magnético no local. A Figura 16 representa uma corrente elétrica alternada passando pela bobina transmissora, proporcionando um campo magnético primário. Este campo magnético primário provoca o surgimento de correntes elétricas secundárias (*eddy currents*) que, por sua vez, proporcionam o surgimento do campo magnético secundário. O campo magnético secundário modifica o primário e, juntos, trazem informações sobre o condutor.



Fonte: Modificado de ELIS, 2006.

Figura 16 – Esquema de indução eletromagnética.

Dos vários métodos eletromagnéticos existentes, os mais utilizados atualmente são o eletromagnético indutivo e o eletromagnético domínio do tempo. O método indutivo tem operação simples e rápida e é mais utilizado para estudos ambientais. O método domínio do tempo é mais sofisticado, não é tão difundido e considera a resposta provocada por uma interrupção de campo eletromagnético, em função do tempo. No método eletromagnético indutivo, a corrente elétrica não é transmitida por contato direto com o solo, que é indispensável nos métodos elétricos e que pode se constituir em fator limitante para investigação de áreas com pavimentos mais rígidos. Os equipamentos utilizados também são chamados de condutivímetros, sendo que os mais consagrados são os aparelhos canadenses EM-31 e EM-34. O primeiro pode ser operado por apenas um homem e atinge uma profundidade de até 6m; o segundo deve ser operado por dois homens e atinge uma profundidade de 7,5m a 60m; em ambos os casos a profundidade atingida depende da orientação das bobinas.

Neste trabalho foi utilizado o equipamento EM-34, com espaçamento entre bobinas de 10m, freqüência de 6,4 KHz e leituras realizadas com as bobinas na vertical (campo horizontal) e horizontal (campo vertical). Para dar melhor visualização nos dados obtidos pelo método EM, foram aplicados processos de filtragens, visando eliminar os efeitos de altas freqüências (aspecto “serrilhado”), resultando em uma suavização do perfil plotado. As filtragens empregadas foram a passa-banda e a passa-baixa. A primeira faz a suavização e mantém os dados no nível de base original enquanto a segunda, além da suavização, reduz os perfis ao mesmo nível de base.

As leituras de condutividade obtidas são expressas diretamente em milisiemens por metro, sendo que o EM-34 permite esta leitura direta por operar em condições de “baixos números de indução”, comparando **Hs** e **Hp**. O número de indução para um semi-espaço é:

$$\theta = (i\omega\mu\sigma)^{1/2} s \quad (\text{eq. 6})$$

Sendo ω a freqüência angular, μ a permeabilidade magnética, σ a condutividade e s , a separação entre as bobinas Tx e Rx. É definido como baixo número de indução para um semi-espaço quando $\theta \leq 0,02$. (SPIES & FRISCHKNECHT, 1991). Então, tem-se:

$$\frac{H_s}{H} \cong \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4} \quad (\text{eq. 7})$$

Onde **Hs** é o campo magnético secundário da bobina receptora, **Hp** é o campo magnético primário na bobina receptora, ω igual a $2\pi f$, f é a freqüência em Hz, μ_0 é a permeabilidade magnética no espaço livre, σ é a condutividade do terreno (mho/m), s é a distância entre as bobinas e $i = (-1)^{1/2}$.

Assim, a razão entre os campos magnéticos secundário e primário fica linearmente proporcional à condutividade do terreno, possibilitando a leitura direta das condutividades medindo-se esta relação. Conhecendo-se **Hs/Hp**, a condutividade aparente indicada pelos EM-31 e EM-34 é:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 S^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (\text{eq. 8})$$

O aparelho EM-34 utiliza duas bobinas circulares, uma transmissora (Tx) e outra receptora (Rx), ligadas por um cabo que pode ter os comprimentos de 10m, 20m ou 40m e que são associados às frequências de 6,4 KHz; 1,6 KHz e 0,4 KHz, respectivamente. As bobinas ainda podem operar no campo vertical (dipolos/bobinas horizontais) e no campo horizontal (dipolos/bobinas verticais), sendo que no campo vertical, a profundidade atingida é o dobro do campo horizontal, para o mesmo espaçamento entre bobinas. Teoricamente, a ordem de grandeza das profundidades atingidas pelo EM-34 são os valores constantes na Tabela 4. A distância entre as bobinas é determinada de acordo com a profundidade da anomalia a ser investigada, considerando que, quanto maior a profundidade, menor será a resolução. BENSON & NOEL (1984) salientam que o sistema EM é ideal quando oferece simultaneamente a correta faixa de profundidade aliada à alta resolução.

Tabela 4 – Distância entre Bobinas e Profundidades Atingidas.

Distância entre bobinas	Profundidade atingida	
	Campo horizontal	Campo vertical
10 m	7,5 m	15 m
20 m	15 m	30 m
40 m	30 m	60 m

Normalmente, a investigação do perfil é feita por caminhamento, que confere bastante rapidez ao trabalho. A técnica do caminhamento possibilita a avaliação dos valores de condutividade em uma mesma profundidade de investigação ao longo do perfil estudado e constitui-se no deslocamento simultâneo, ao longo do terreno, da bobina emissora e receptora, mantendo-se fixa a distância entre elas e a posição dos dipolos.

Quando se induz um campo eletromagnético em subsuperfície, parte da energia incidente absorvida tem a amplitude de suas ondas diminuída exponencialmente ao

atravessar os corpos condutores. A penetração do sinal, “skin depth”, pode ser qualitativamente estimada pela equação 9:

$$SKINDEPTH \cong 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (\text{eq. 9})$$

Onde: ρ é a resistividade elétrica e f é a frequência de operação do sistema.

Ruídos como linhas de força, objetos metálicos enterrados, rádios transmissores, veículos, construções subterrâneas etc., interferem nos levantamentos EM. Seu sucesso é relacionado com os contrastes de condutividade de subsuperfície como, por exemplo, a diferença de condutividade entre um tanque subterrâneo e o material circundante é facilmente detectável pelo método. O EM é afetado por efeitos devidos a coberturas condutivas, podendo, em alguns casos, ter sua penetração comprometida em maiores profundidades. O método tem sido bastante utilizado na prospecção de jazidas maciças de sulfetos, na geologia de engenharia (detecção de fraturas e litologias), hidrogeologia (aquíferos e fraturamentos) e geologia ambiental (plumas de contaminação). Dentre as aplicações mais recentes podem ser citadas a localização de resíduos, tambores, tanques subterrâneos, determinação de plumas de contaminação, detecção e mapeamento de dutos metálicos enterrados etc.

7 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1- Eletrorresistividade e Polarização Induzida - IP

Os resultados de eletrorresistividade e polarização induzida são, no contexto deste trabalho, aqueles que apresentam resultados mais significativos e passíveis de correlação com a contaminação ocorrida.

As Figuras 17, 18, 19 e 20 trazem as pseudo-seções e seções modeladas de resistividade e cargabilidade das linhas 1 e 2. As escalas cromáticas de resistividade estão expressas em ohms.m e as escalas cromáticas de cargabilidade estão em mV/V.

Na revisão da literatura foi citado o modelo de SAUCK (2000), que ressalta o aparecimento de uma área diferenciada na parte inferior da zona vadosa em vazamentos antigos, que possibilitaria a máxima atividade microbológica provocando uma modificação na assinatura geoeletrica da contaminação de hidrocarboneto, que passaria de resistivo para condutivo. Porém, outros estudos (AZAMBUJA *et al.* 1999; DELANEY *et al.* 2000; CASTRO & BRANCO, 2003; VEGA *et al.* 2003) não encontram os resultados condutivos propostos por SAUCK. Dentre estes trabalhos, destaca-se o de DELANEY *et al.* (2000) que estudou contaminação de hidrocarbonetos em solo fino, encontrando pluma resistiva em vazamento antigo. O citado autor aponta que esta particularidade da pluma contaminante em solos finos acontece porque na franja capilar os hidrocarbonetos expõem a água e ficam aderidos às partículas dos pequenos grãos de solos, restringindo a mobilidade dos íons e criando uma região resistiva.

A análise dos resultados de resistividade e a geologia com características argilosas da região do Posto Gigio indicaram a pluma contaminante como uma anomalia resistiva, confirmando o estudo de DELANEY em solos finos e contrapondo-se ao modelo de SAUCK em solos arenosos.

Na Figura 17, que contém o perfil de resistividade da linha 1, aparece uma anomalia resistiva na pseudo-seção e na seção modelada de resistividade entre as estacas 80 a 170. Da mesma forma, na Figura 19, onde é apresentado o perfil de resistividade da linha 2, também aparece uma anomalia resistiva entre as estacas 80 a 170 na pseudo-seção e seção modelada de resistividade.

Analisando-se as Figuras 18 e 20, resultados de IP, pode-se observar que no mesmo trecho de estacas em que aparecem as anomalias de resistividade (estacas 80 a 170), também aparecem anomalias de cargabilidade, sendo que a correlação mais evidente é observada na linha 2. As anomalias de resistividade detectadas e associadas à contaminação pelos hidrocarbonetos são de maior resistividade e, as de cargabilidade (IP), são de valores mais elevados.

Sabe-se que a principal forma de condução da corrente elétrica na natureza é a iônica. Assim, um aumento da concentração de íons implica em uma queda na resistividade e vice e versa. Da mesma forma, de acordo com GRAHAME (1947, apud GALLAS 2000), uma maior concentração iônica acarreta em uma menor cargabilidade, conforme citado anteriormente nas equações 3 e 4. Conclui-se que, na presente situação, a contaminação pelos hidrocarbonetos, provavelmente influenciada pelo fator tempo, acarretou em uma menor disponibilidade de íons livres resultando em um aumento da resistividade e também da cargabilidade (IP).

Salienta-se que os resultados encontrados nas pseudo-seções foram mais representativos que aqueles das seções modeladas, demonstrando que, neste caso, o modelo não foi muito adequado. As seções modeladas e pseudo-seções de resistividade mostraram feições mais facilmente correlacionáveis à contaminação do que as observadas na cargabilidade.

LINHA 1 (ENTRE AS PISTAS DA RODOVIA)

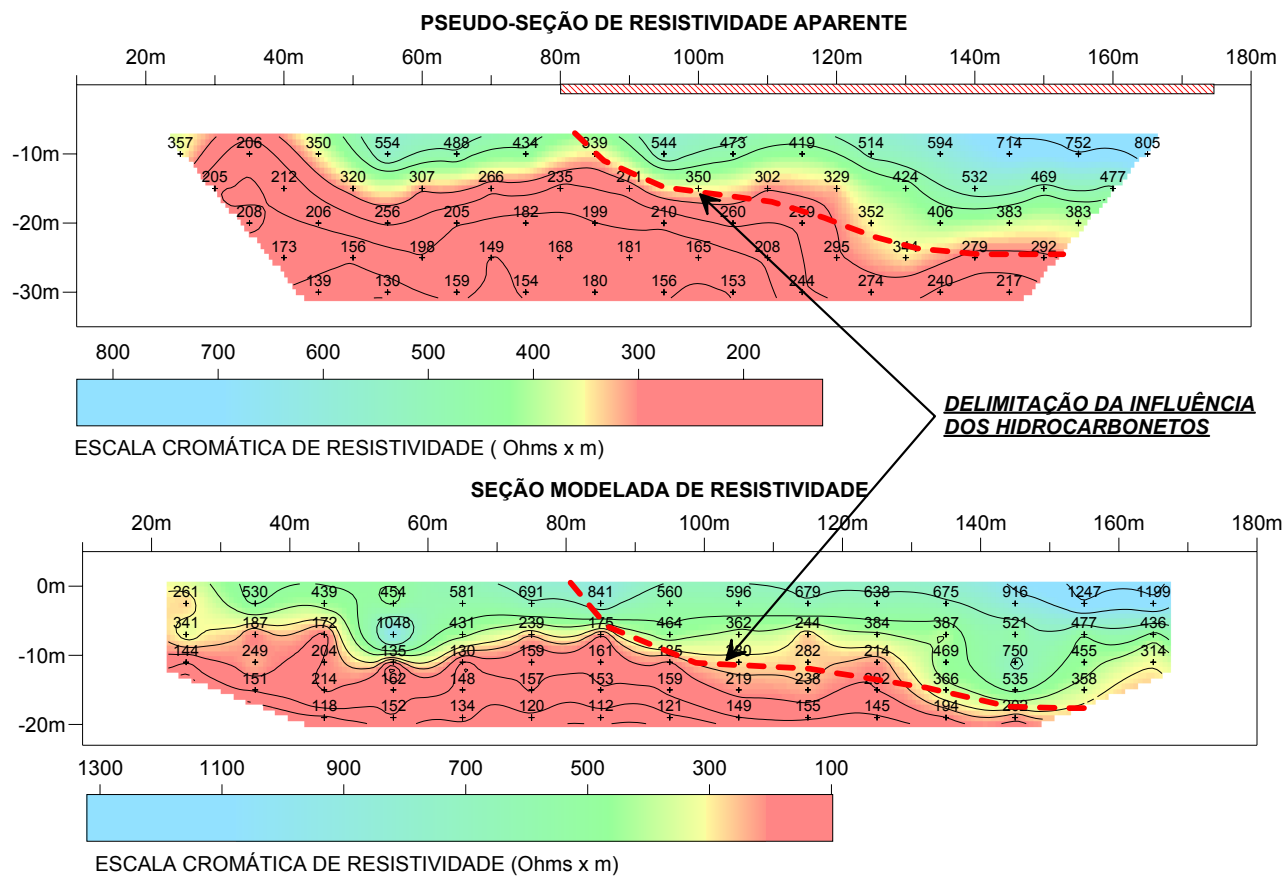


Figura 17- Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha 1.

LINHA 1 (ENTRE AS PISTAS DA RODOVIA)

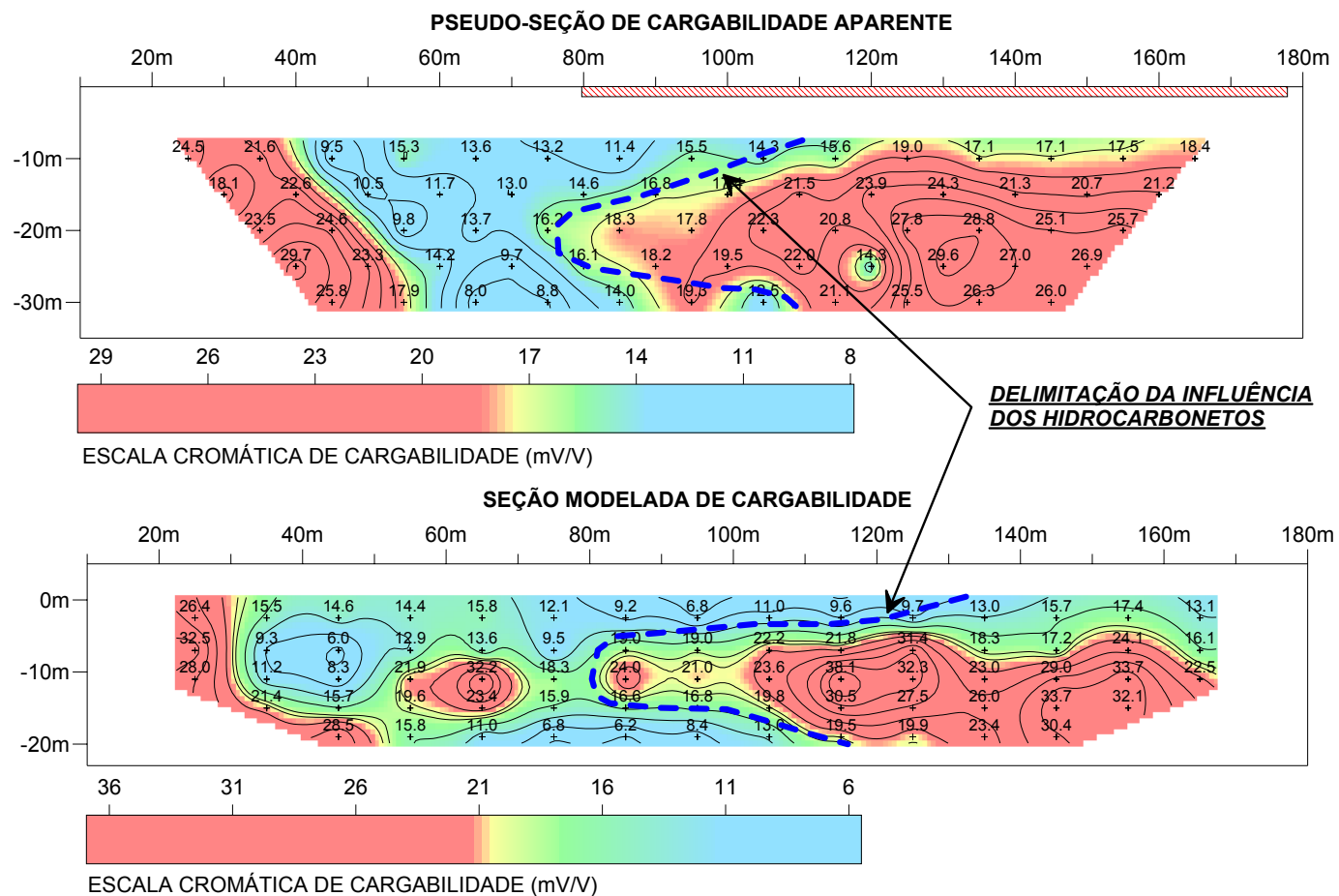


Figura 18 - Pseudo-seção de cargabilidade aparente e seção modelada de cargabilidade da Linha 1.

LINHA 2 (ESTRADA DO POVOADO, JUSANTE DA RODOVIA)

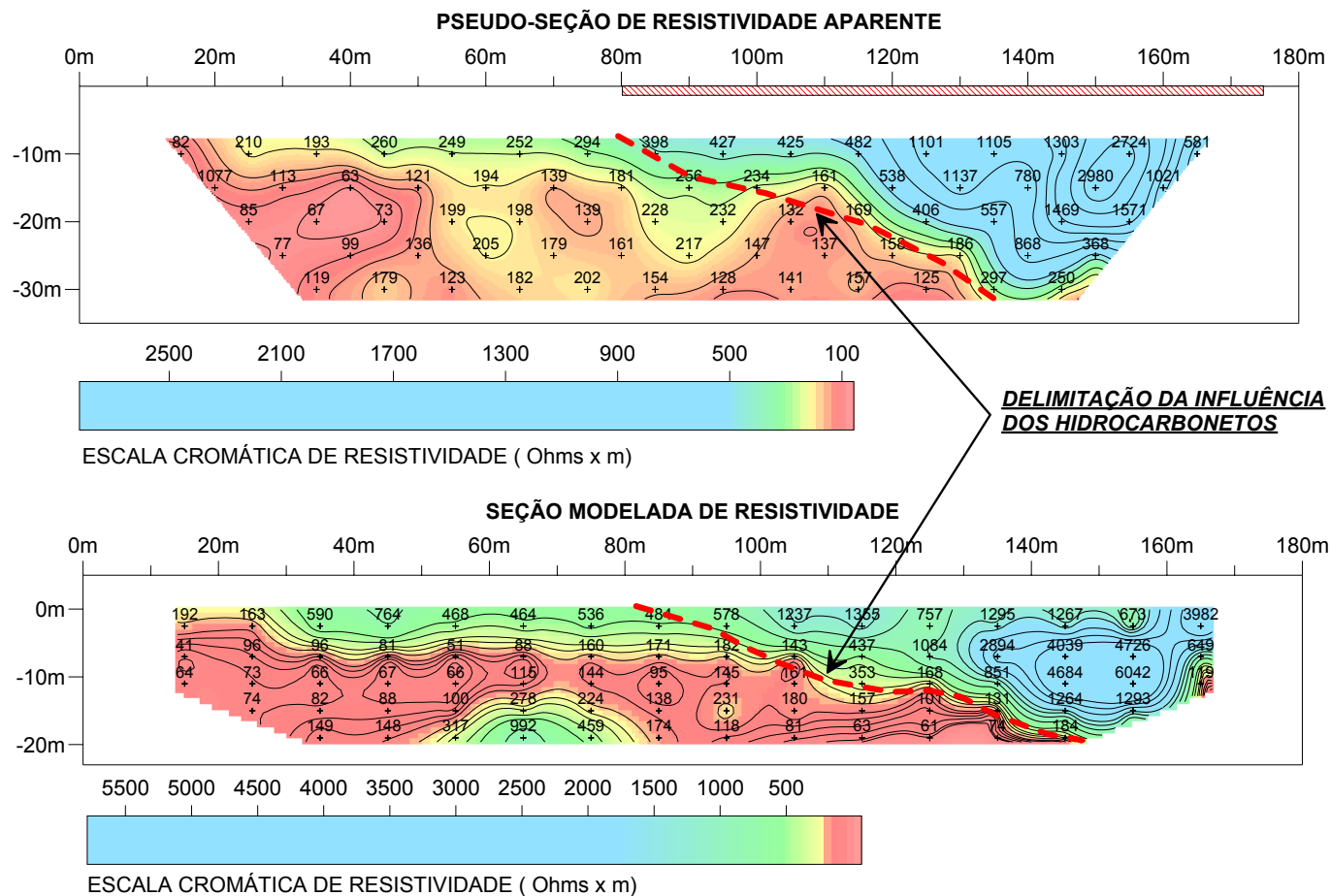


Figura 19 - Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha 2.

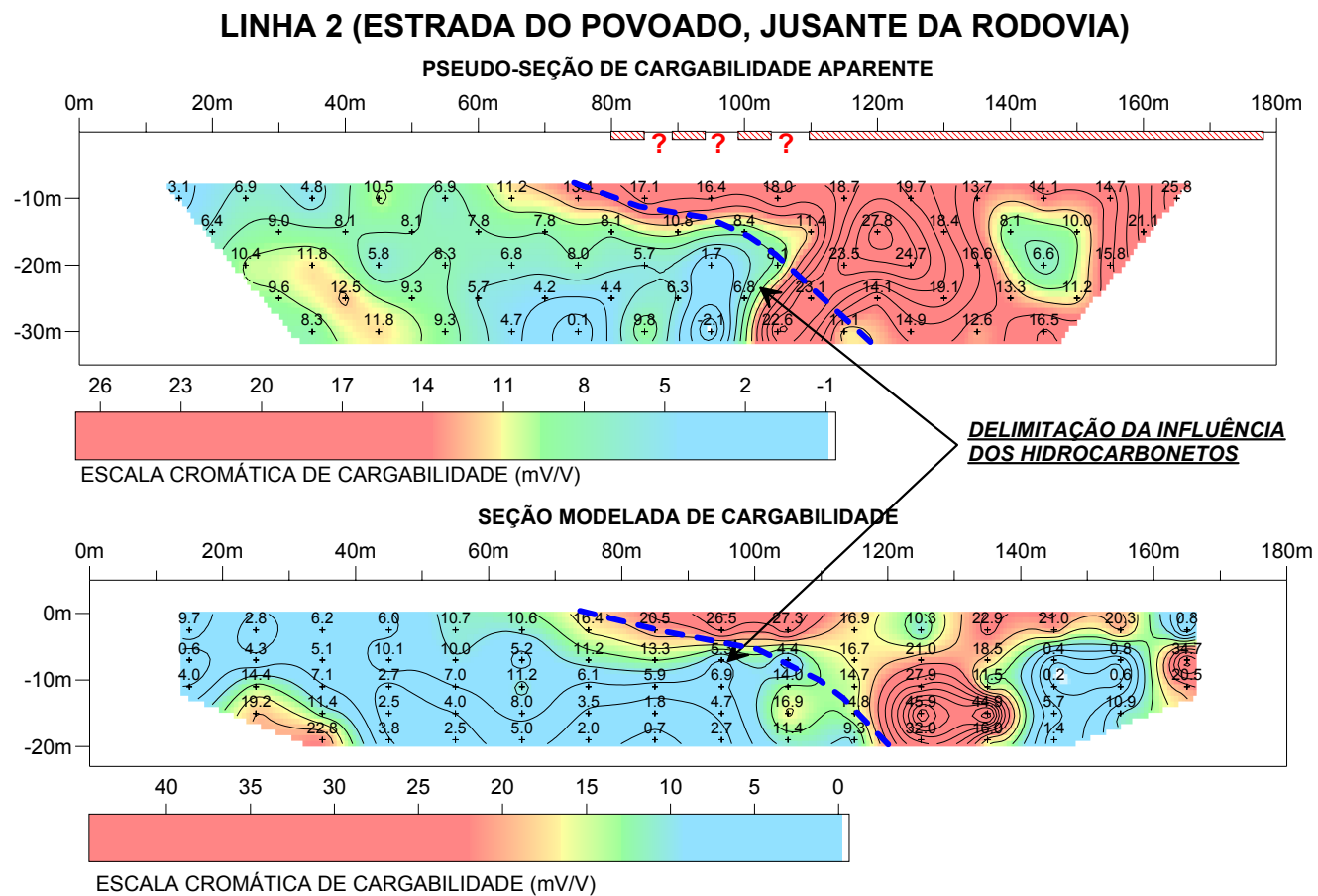


Figura 20 - Pseudo-seção de cargabilidade aparente e seção modelada de cargabilidade da Linha 2.

As pseudo-seções e seções modeladas apresentam apenas as informações do perfil investigado. Para se obter uma visão da distribuição em planta dos parâmetros de resistividade e IP na área pesquisada, faz-se necessário elaborar mapas a partir da escolha de um determinado nível de investigação. Na maioria das vezes, o segundo nível costuma ser o mais representativo (GALLAS, 2000). As Figuras 21 e 22 trazem os mapas de resistividade e cargabilidade da área investigada no segundo nível.

Para se conhecer em planta o comportamento dos parâmetros estudados com o aumento da profundidade também foi elaborado um mapa do nível 3 para eletrorresistividade e cargabilidade. As Figuras 23 e 24 trazem os mapas da área investigada no terceiro nível.

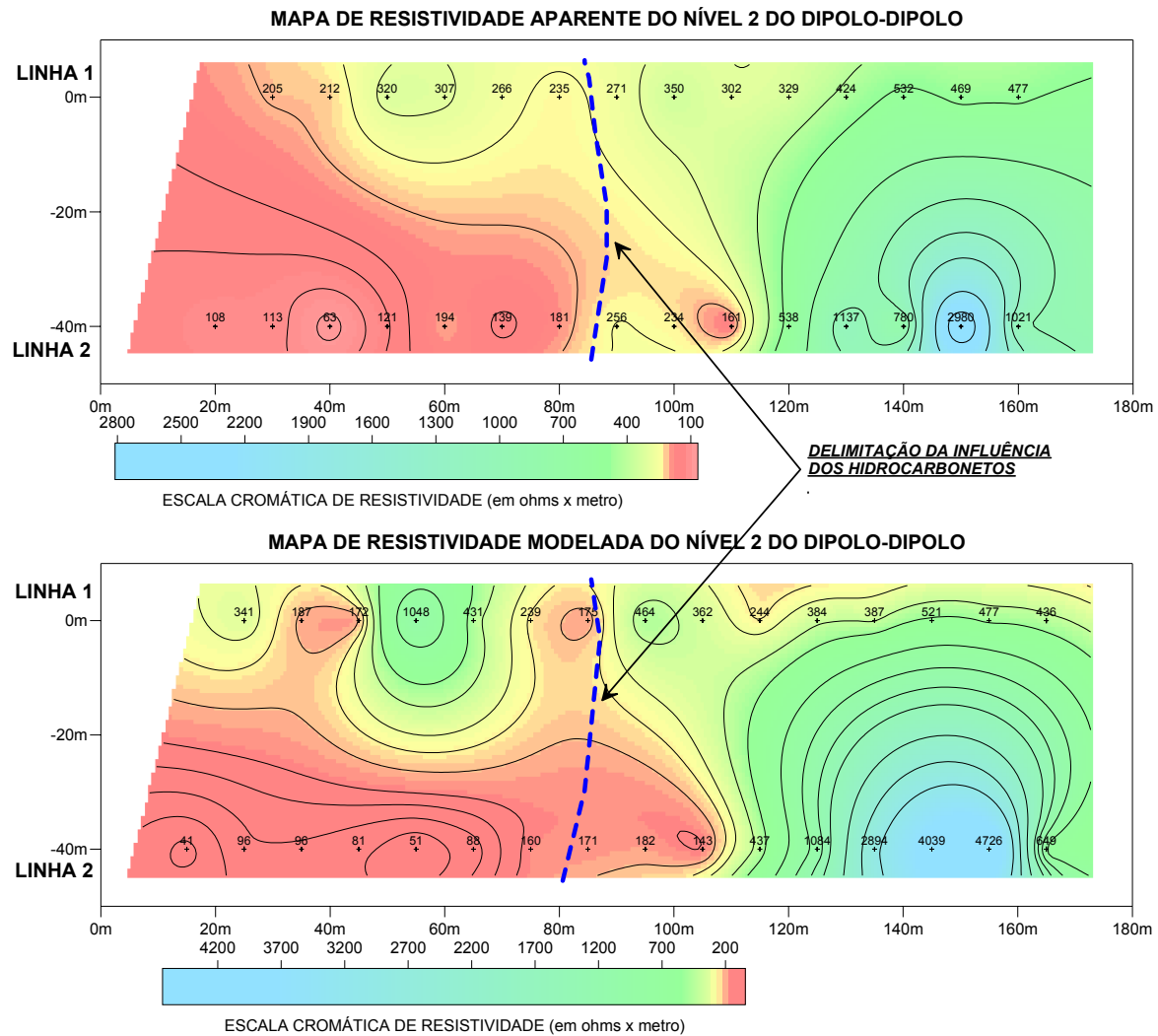


Figura 21 - Mapa de resistividade aparente e resistividade modelada do nível 2 do dipolo- dipolo.

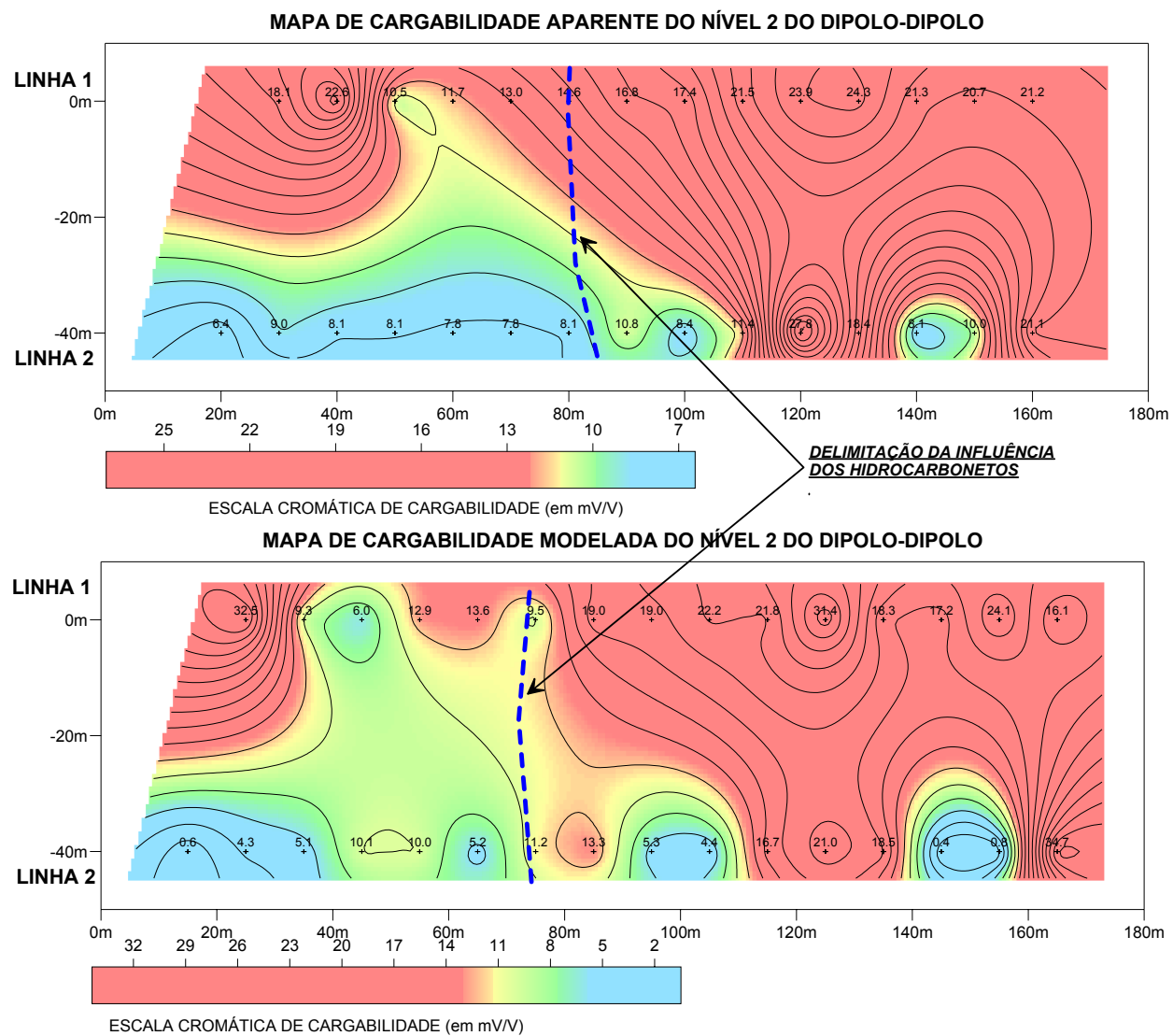


Figura 22 - Mapa de cargaabilidade aparente e cargaabilidade modelada do nível 2 do dipolo – dipolo.

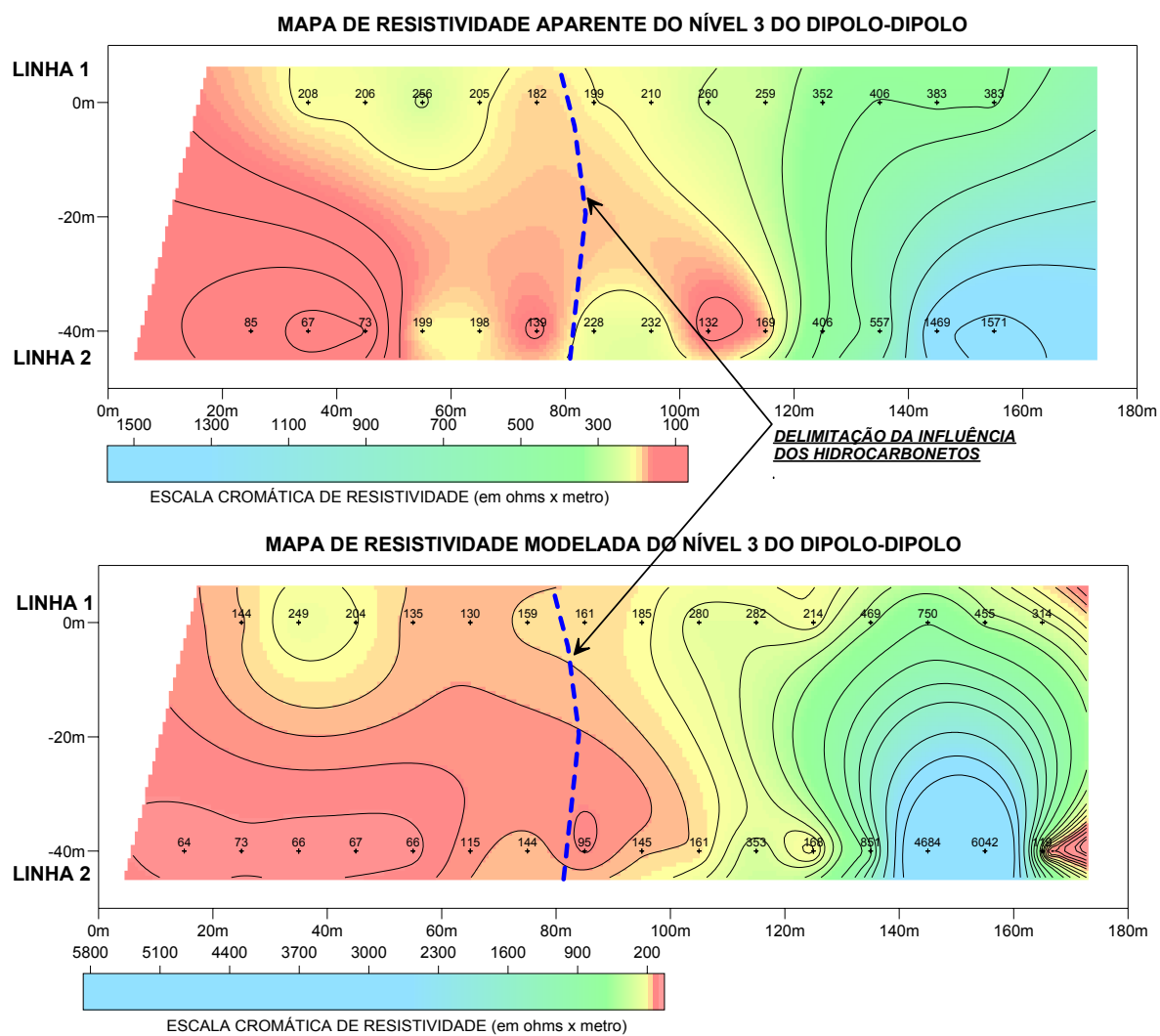


Figura 23 - Mapa de resistividade aparente e resistividade modelada do nível 3 do dipolo- dipolo.

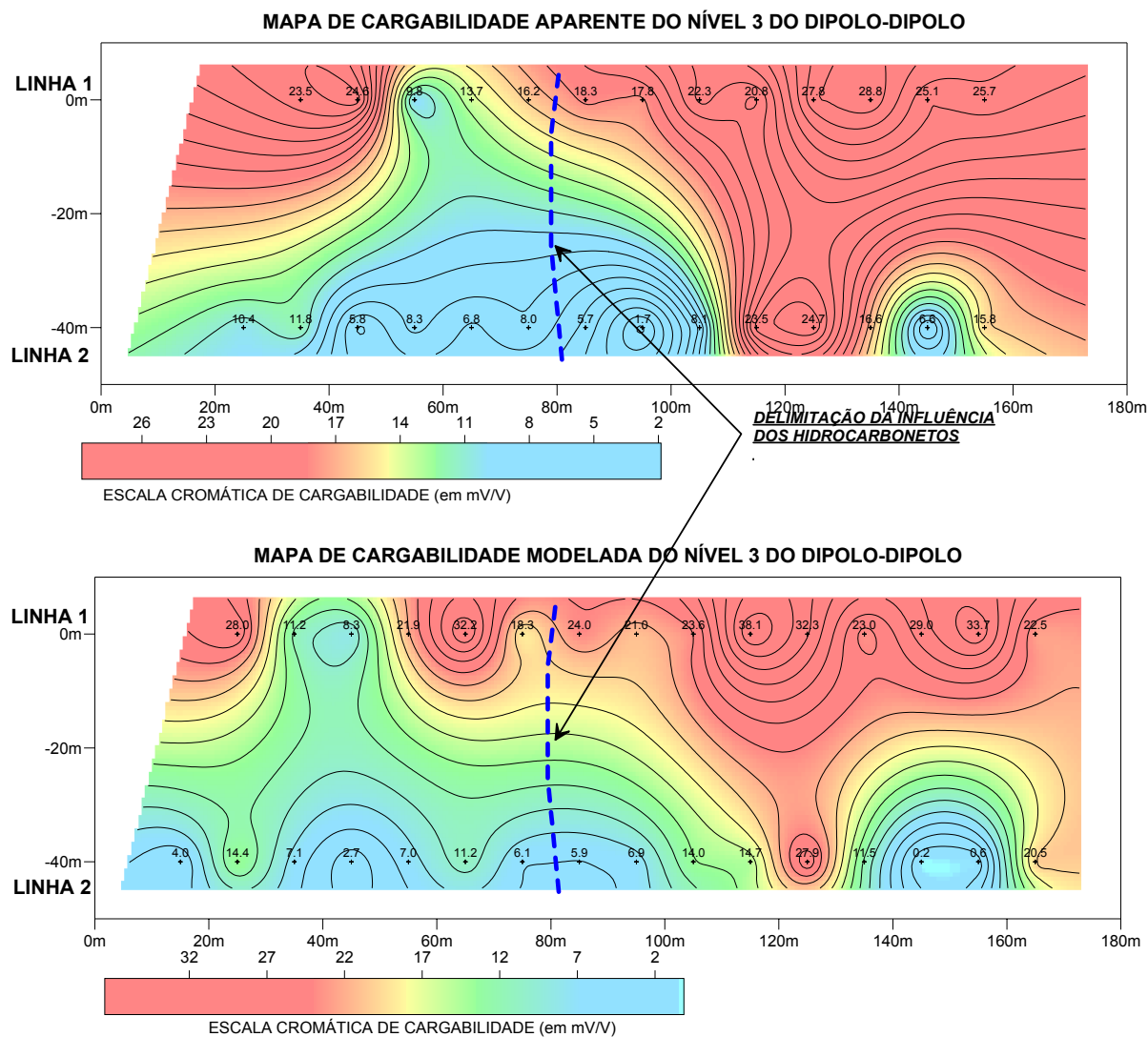


Figura 24 - Mapa de cargabilidade aparente e cargabilidade modelada do nível 3 do dipolo – dipolo.

7.2 – Eletromagnético – EM 34

As Figuras 25 e 26 apresentam os valores obtidos nos ensaios eletromagnéticos para os campos horizontal e vertical das linhas 1 e 2, respectivamente. Além dos dados brutos coletados no campo, são apresentadas leituras filtradas passa-banda e passa-baixa, que são suavizadas para facilitar a interpretação.

O levantamento eletromagnético com sistema EM-34 não apresentou anomalias correlacionáveis à região contaminada, à exceção da linha 1, comentado adiante.

Conforme citado na revisão da literatura, os dados do campo vertical expressam uma investigação mais profunda e os de campo horizontal, uma investigação mais rasa. Como foi adotada a distância entre bobinas de 10m, no campo horizontal a profundidade máxima de investigação é de 7,5m e, no campo vertical é de 15m.

Na linha 1 (canteiro entre as pistas da rodovia), o nível freático é da ordem de 10m, conforme constatado no PM-09 e PM-10, cujas profundidades são de 9,6 e 10,17m, respectivamente. Outros PMs (02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08), situados em cotas semelhantes, também apresentam níveis d'água desta ordem. Na linha 2 (estrada do povoado), o nível freático está a uma profundidade da ordem de 5,0m, conforme dados dos PMs 11 e 19, cujas profundidades do nível d'água são de 5,75 e 7,75m, respectivamente. Estes dados constam no Anexo 5 e as posições dos mesmos podem ser vistas na Figura 6.

Desta forma, no caso da linha 1, somente os dados do campo vertical atingiriam uma eventual zona contaminada e, no entanto, os dados não mostram valores anômalos. Porém, pode-se observar uma ligeira diminuição nos resultados de condutividade, precisamente no mesmo trecho em que foram verificados valores mais elevados de resistividade.

Na linha 2, tanto os dados do campo vertical como horizontal são compatíveis com a profundidade das águas freáticas e, da mesma forma, também não apresentaram feições condutivas correlacionáveis à eventual contaminação. Nota-se que no final desta linha, há uma certa perturbação nos valores de condutividade, mas que devem ser atribuídos aos aterramentos dos postes que existem neste trecho do perfil

Observa-se também na Figura 25 que a diferença de faixas de condutividade entre os campos horizontal e vertical está relacionada ao nível d'água, sendo que os valores maiores de condutividade aparecem na área saturada. No campo horizontal a condutividade média é de 20 mS e é medida acima do nível d'água, enquanto no campo vertical a condutividade média é de 30mS e é medida abaixo do nível d'água. Na Figura 26, as leituras de condutividade nos campos horizontal e vertical são muito próximas, pois neste perfil ambas as leituras atingem o nível d'água.

As Figuras 27 e 28 trazem os mapas de distribuição em planta das condutividades dos campos vertical e horizontal, dados brutos com as filtragens passa-baixa e passa-banda.

ENSAIO ELETROMAGNÉTICO EM-34

LINHA 1

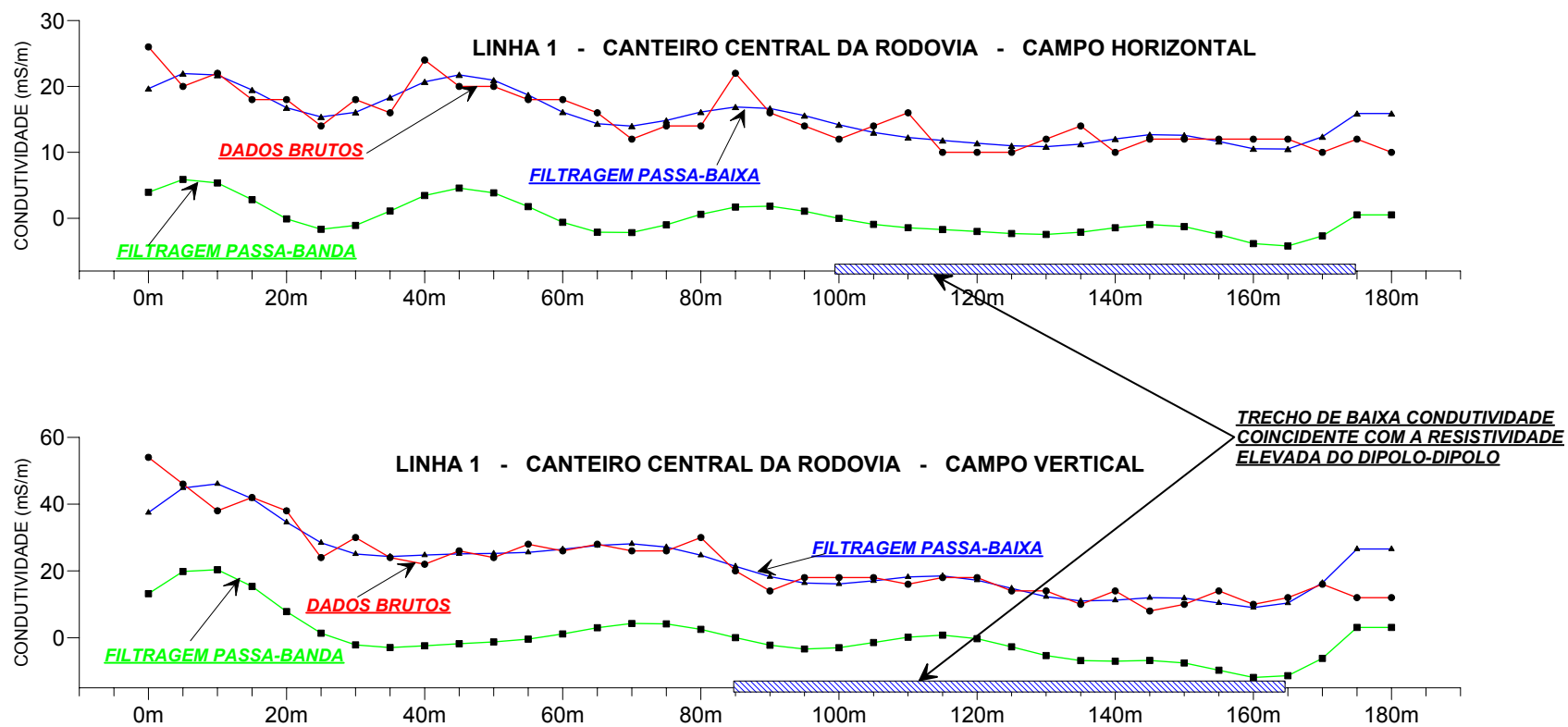


Figura 25 – Perfil EM da Linha 1 canteiro central Rod. Fernão Dias – campo horizontal e vertical.

ENSAIO ELETROMAGNÉTICO EM-34

LINHA 2

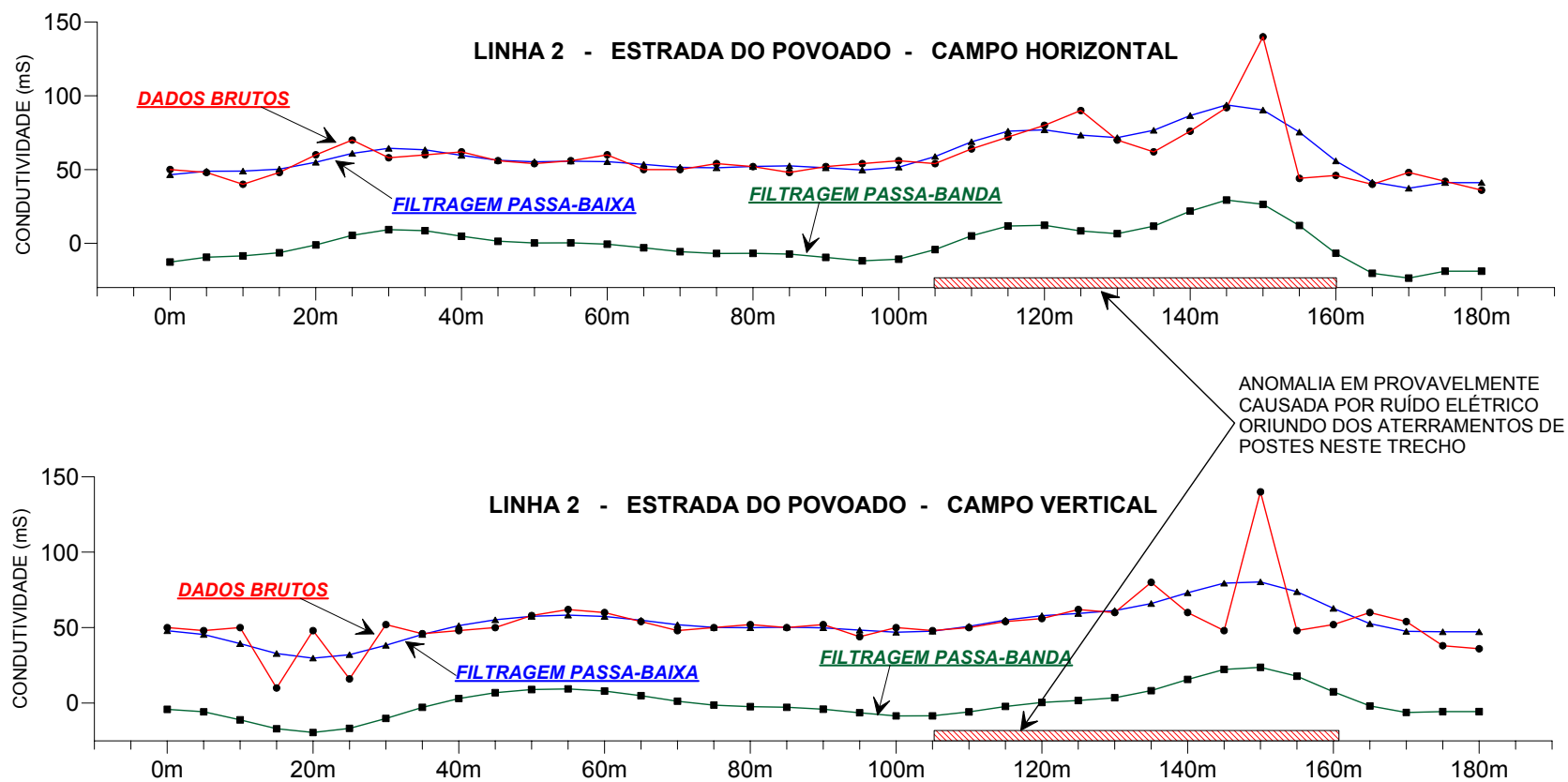


Figura 26 – Perfil EM da Linha 2 estrada do povoado – campo horizontal e vertical.

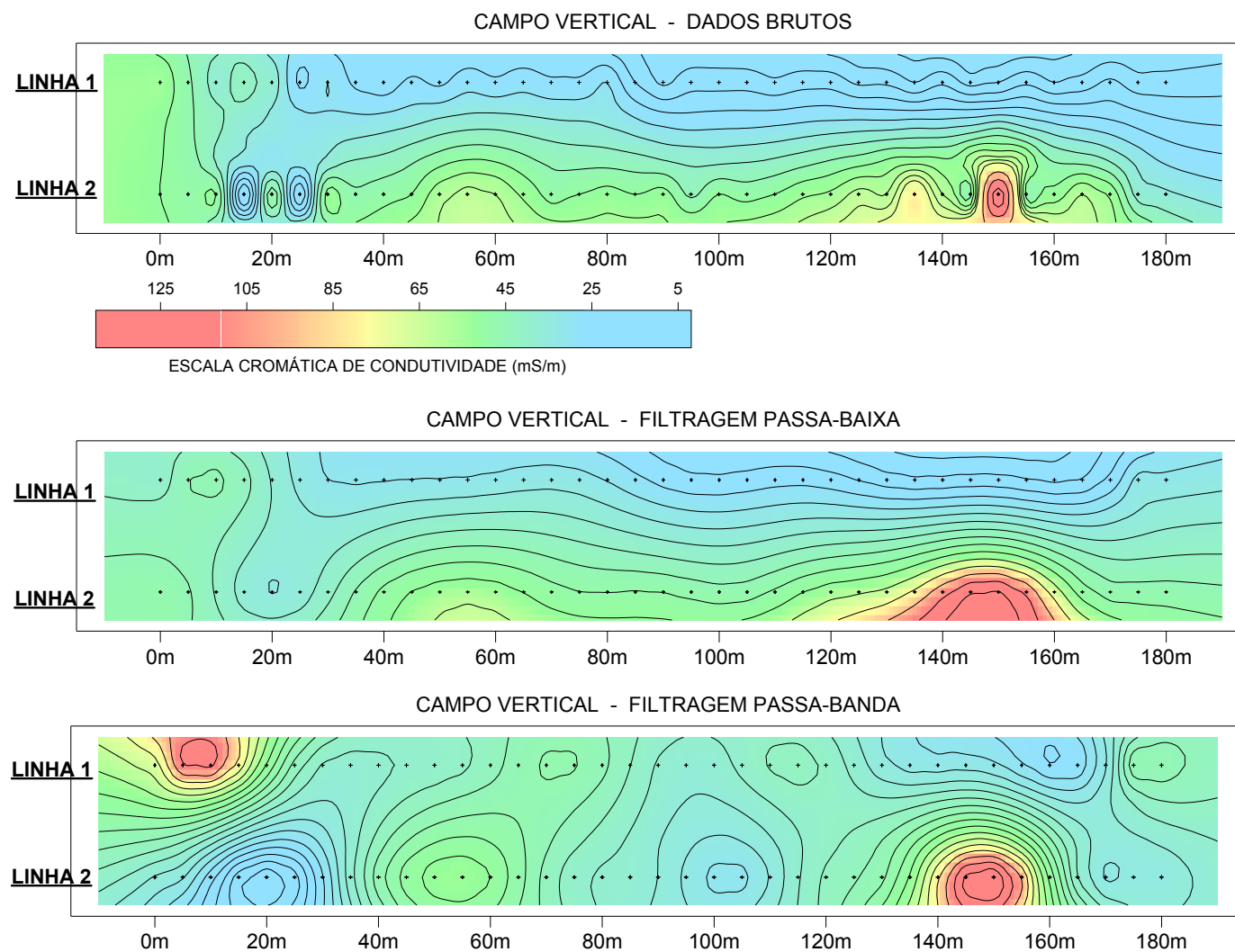


Figura 27 – Mapa condutividade campo vertical – dados brutos e filtrados.

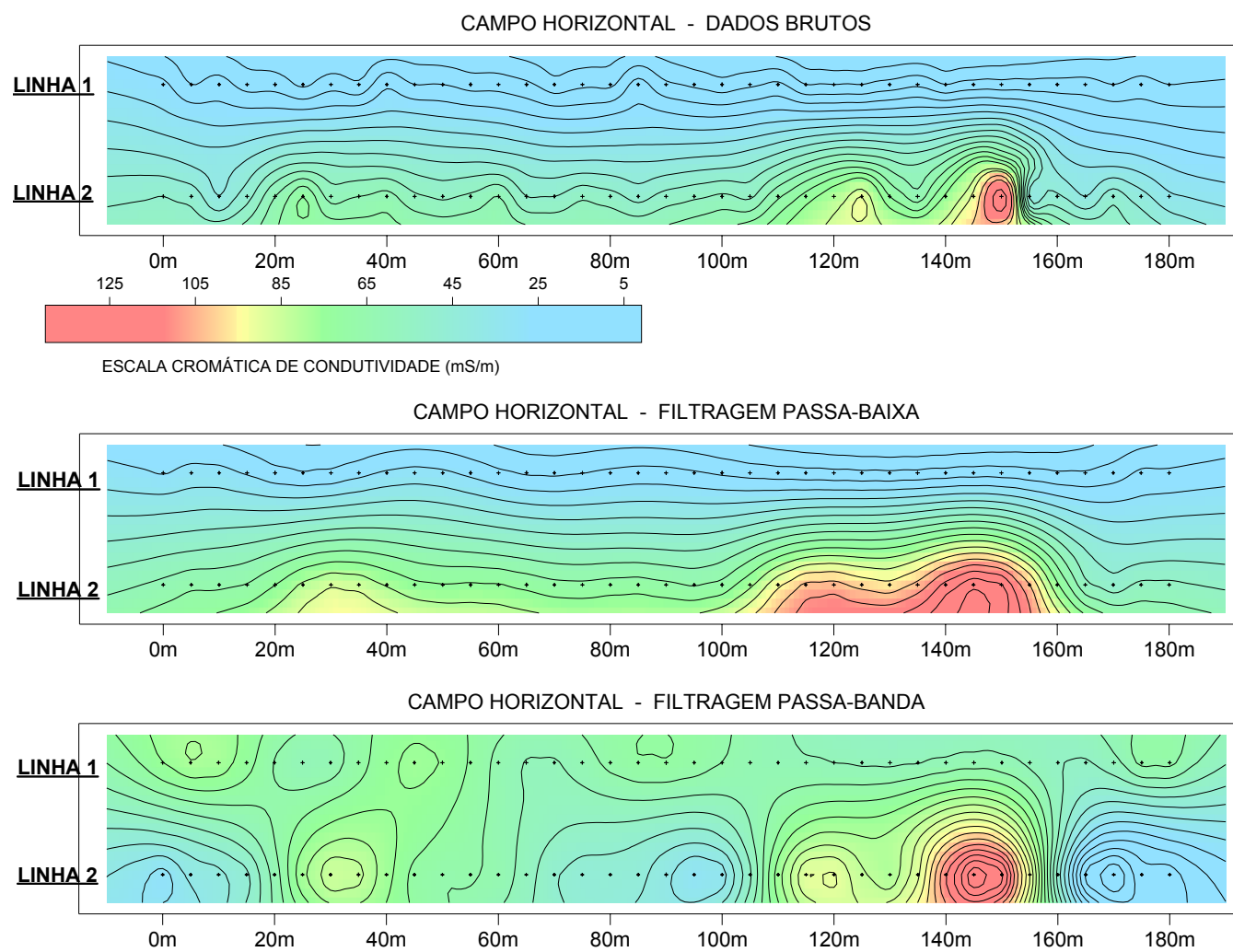


Figura 28 – Mapa condutividade campo horizontal – dados brutos e filtrados.

7.3 - Georradar – GPR

Conforme se observa nas Figuras 29 e 30, não há indicação clara de alguma feição que possa ser correlacionada às possíveis contaminações já detectadas pelos métodos da eletrorresistividade e IP. Algumas reflexões rasas entre as estacas 40 e 70 (linha 1) e 10 e 30 (linha 2), devem ser atribuídas à existência de causas superficiais e não associadas à contaminação.

A principal causa de baixa expressividade nos resultados pode ser atribuída à pouca profundidade de investigação obtida pelo GPR no local, que foi de no máximo 3m, não atingindo sequer o nível d'água. Conforme dados de poços de monitoramento existentes no local, o nível d'água situa-se em torno de 10m na linha 1 e de 6m na linha 2. Assim, alguma feição que aparecesse, poderia, no máximo, ser atribuída à franja capilar.

Não se exclui a possibilidade, no entanto, de que o emprego de antenas de freqüências mais baixas, de 50 MHz ou menores ainda, pudesse atingir a profundidade desejada, apesar da conseqüente perda de resolução inerente às baixas freqüências.

O método GPR apresenta melhores resultados em solos resistivos, que proporcionam maior penetração e melhores reflexões do sinal. No caso da área estudada, o método não apresentou os resultados esperados e revelou-se inadequado para os objetivos propostos.

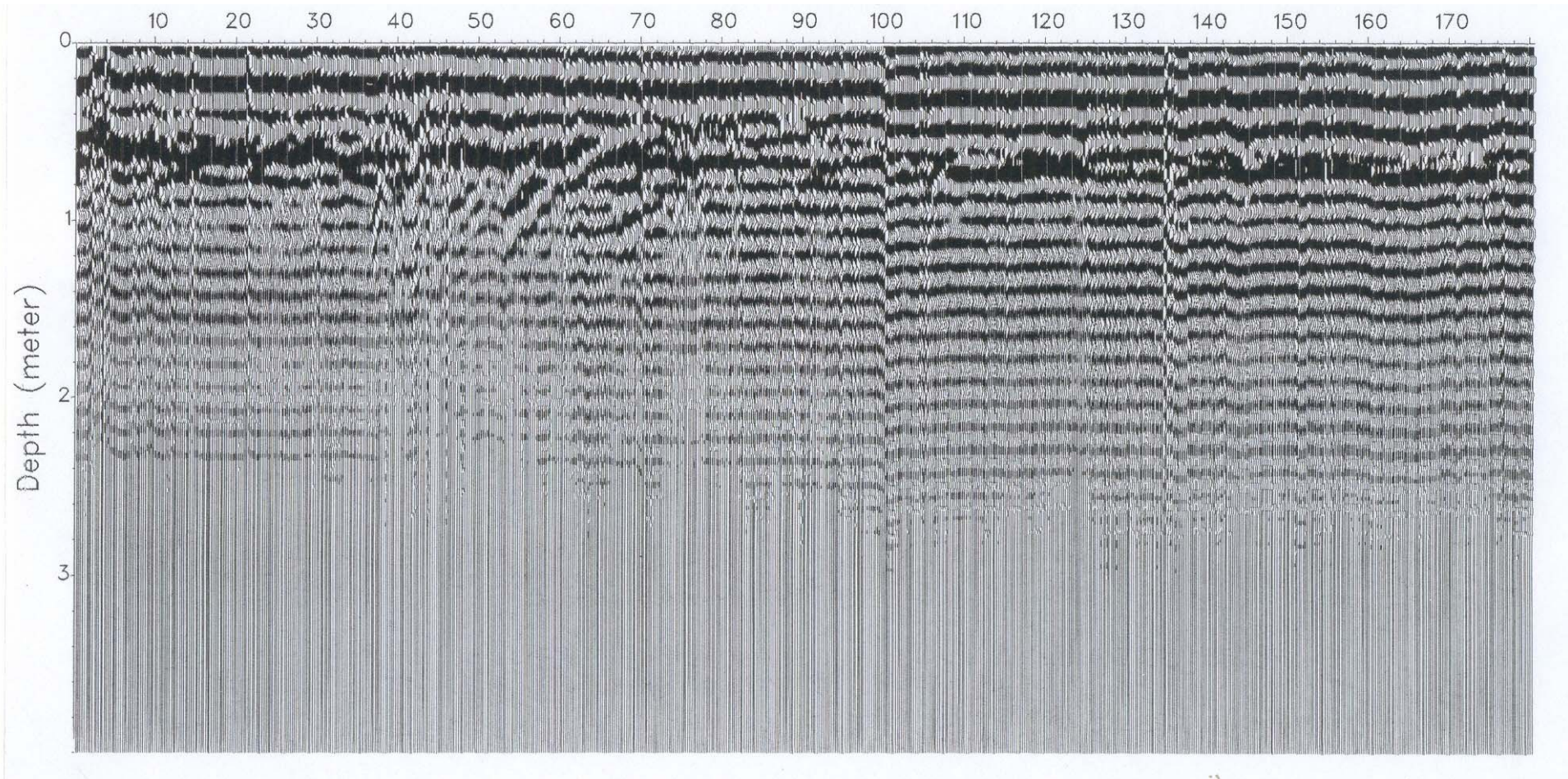


Figura 29 – Perfil GPR da Linha 1 canteiro central da Rod. Fernão Dias.

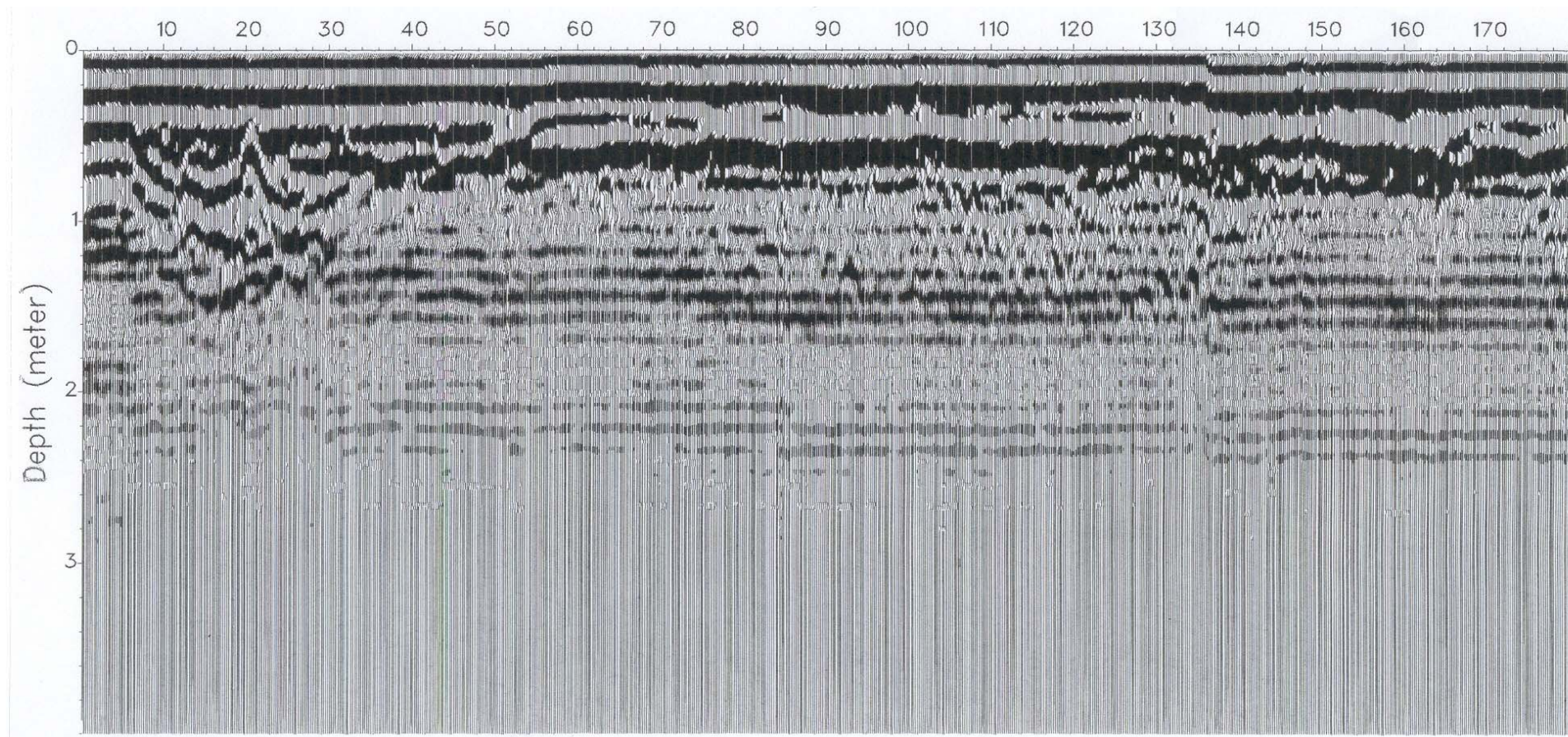


Figura 30 – Perfil GPR da Linha 2 rua do povoado.

7. 4 - Análises Químicas dos Poços de 2001 e 2005

A análise multivariada, empregada no processamento dos dados das análises químicas desta dissertação, é uma ferramenta estatística que utiliza vários métodos para possibilitar a interpretação e correlação de um determinado conjunto de dados. Dentre os métodos disponíveis, foi utilizada a análise de componentes principais (PCA), que reduz o número de variáveis e fornece uma visão estatística do agrupamento, através de parâmetros que identificam cada um dos componentes em função do todo.

As concentrações dos compostos BTEX e PAH na água subterrânea da área (Anexos 1 e 3) foram processadas possibilitando a simplificação das 20 variáveis (dados químicos de contaminantes) dos 21 poços no ano de 2001 e dos 18 poços em 2005, em um único fator por poço. Foram utilizados os valores do primeiro eixo do PCA, que explicou 67,36% da variação dos dados em 2001 e 99,81% da variação dos dados em 2005.

Resumidamente, o processamento por análise multivariada, teve por objetivo unificar os resultados de diferentes análises de um mesmo poço, de forma a se estabelecer correlações com os resultados de diferentes épocas e diferentes poços em função da contaminação como um todo. Isto se deve ao fato de que a degradação e/ou permanência dos contaminantes podem ser diferentes para cada parâmetro analisado.

As Figuras 31 e 32 apresentam os mapas de contaminação da área em 2001 e em 2005 e a comparação entre eles mostra que a área de abrangência da contaminação antiga era maior que a da mais recente.

Na Figura 33 é apresentado um mapa de contaminação onde foram plotados os poços de amostragem de águas freáticas para 2001 e 2005. As curvas de isovalores e a escala cromática são para as concentrações de benzeno de 2001. Observa-se que em 2001 havia vários poços com valores anômalos, enquanto que em 2005 praticamente todos os poços estavam normalizados. Os resultados das análises químicas de 2001 mostram uma área contaminada que é delimitada pela curva de isovalores acima dos VOI definidos pela CETESB, traçada em vermelho. Observa-se na figura que a pluma de contaminação é interceptada a jusante pelas linhas de ensaios geofísicos e mostra uma boa correlação com as anomalias indicadas de IP e, principalmente, de resistividade.

Para permitir uma melhor visualização do mapa de comparação das contaminações de benzeno, a Figura 34 apresenta os resultados obtidos em uma simulação tridimensional das concentrações de benzeno em 2001 e 2005.

Se forem comparados os mapas de benzeno, com os de análise multivariada de 2001 e 2005, constata-se uma boa correlação entre eles, com decréscimo de contaminação ao longo do tempo. Esta diminuição deve ter ocorrido provavelmente devido à atenuação natural e aos trabalhos locais de bombeamento da água subterrânea. A substituição das tubulações e tanques de combustíveis em 2004 certamente contribuiu para estancar algum eventual vazamento existente

Conforme os dados históricos do posto, desde 1998 foram apresentados indícios/registros de vazamentos de diesel. Embora os tanques antigos tenham sido substituídos em 2004, em 2005 ainda aparecem dados de contaminação na área, particularmente de benzeno, que é um componente mais característico de contaminações de gasolina que de diesel. Portanto, embora se tenha relato apenas de contaminações diesel, supõe-se que houve vazamento de gasolina no local.

O sentido de deslocamento da contaminação, considerando a posição dos tanques de combustíveis e a posição das linhas de levantamento geofísico é coincidente com as direções preferenciais dos fluxos subterrâneos indicadas no mapa potenciométrico (Figura 8).

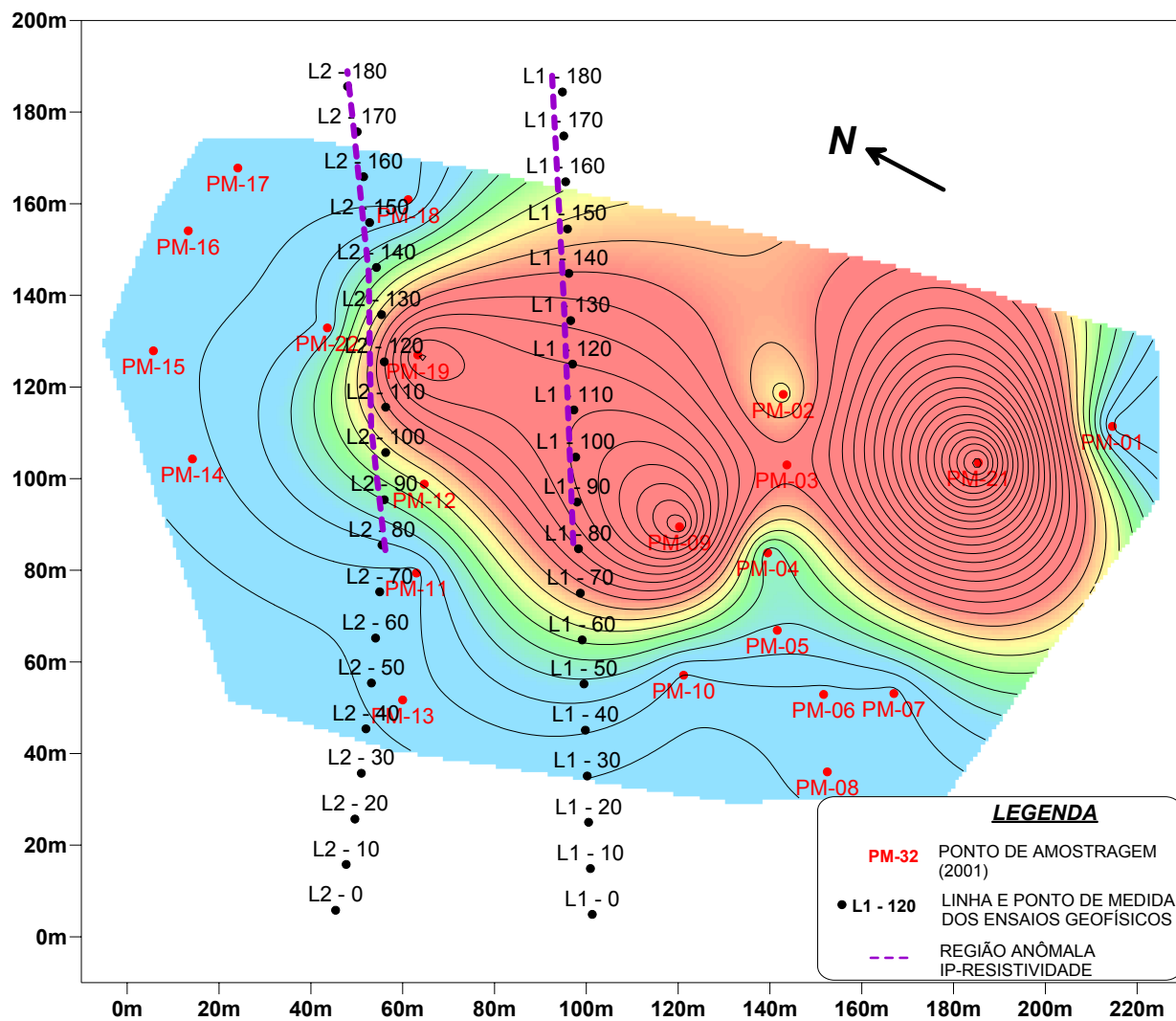


Figura 31 – Mapa de contaminação por análise multivariada: dados químicos dos poços em 2001.

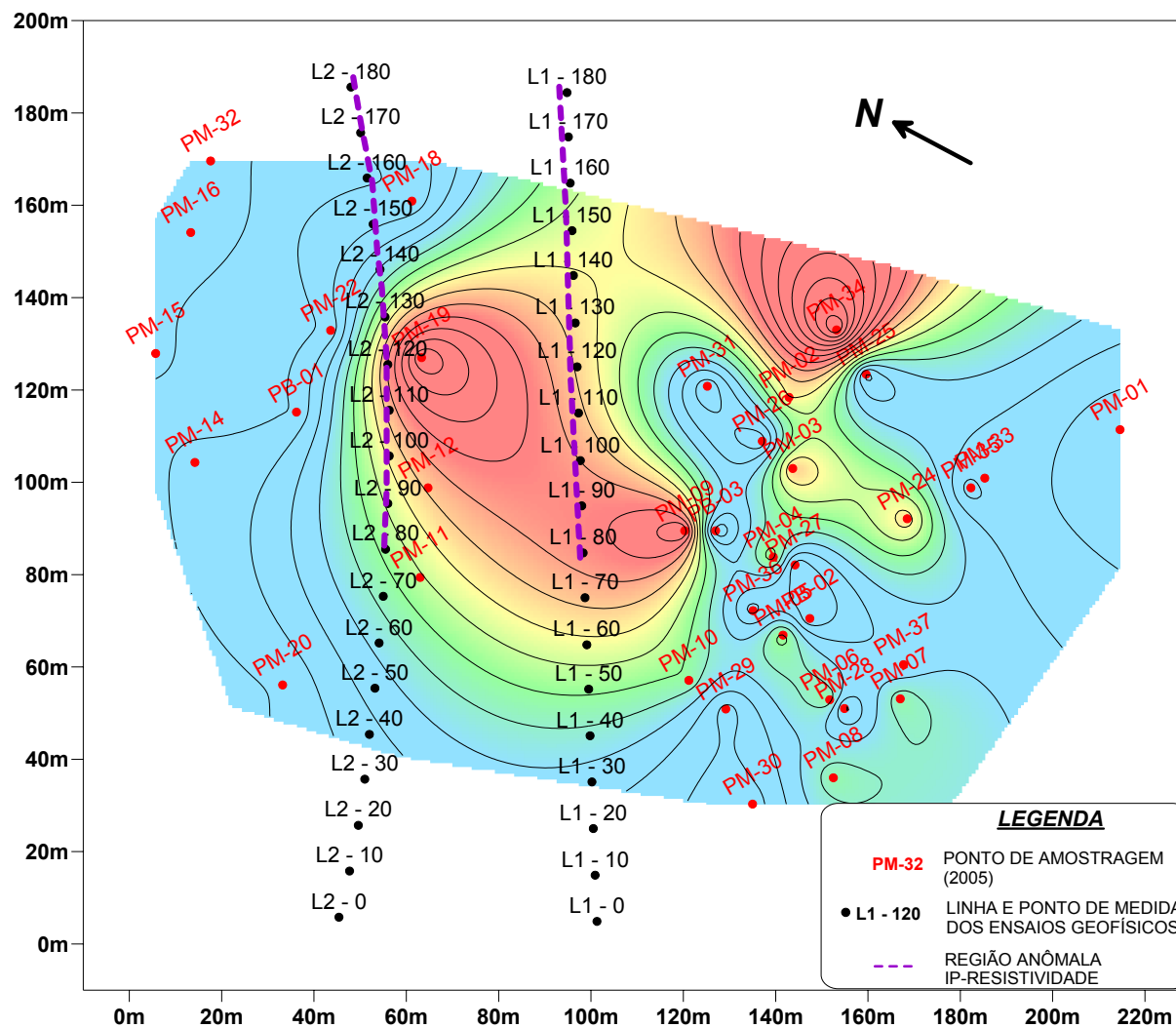


Figura 32 – Mapa de contaminação por análise multivariada: dados químicos dos poços em 2005.

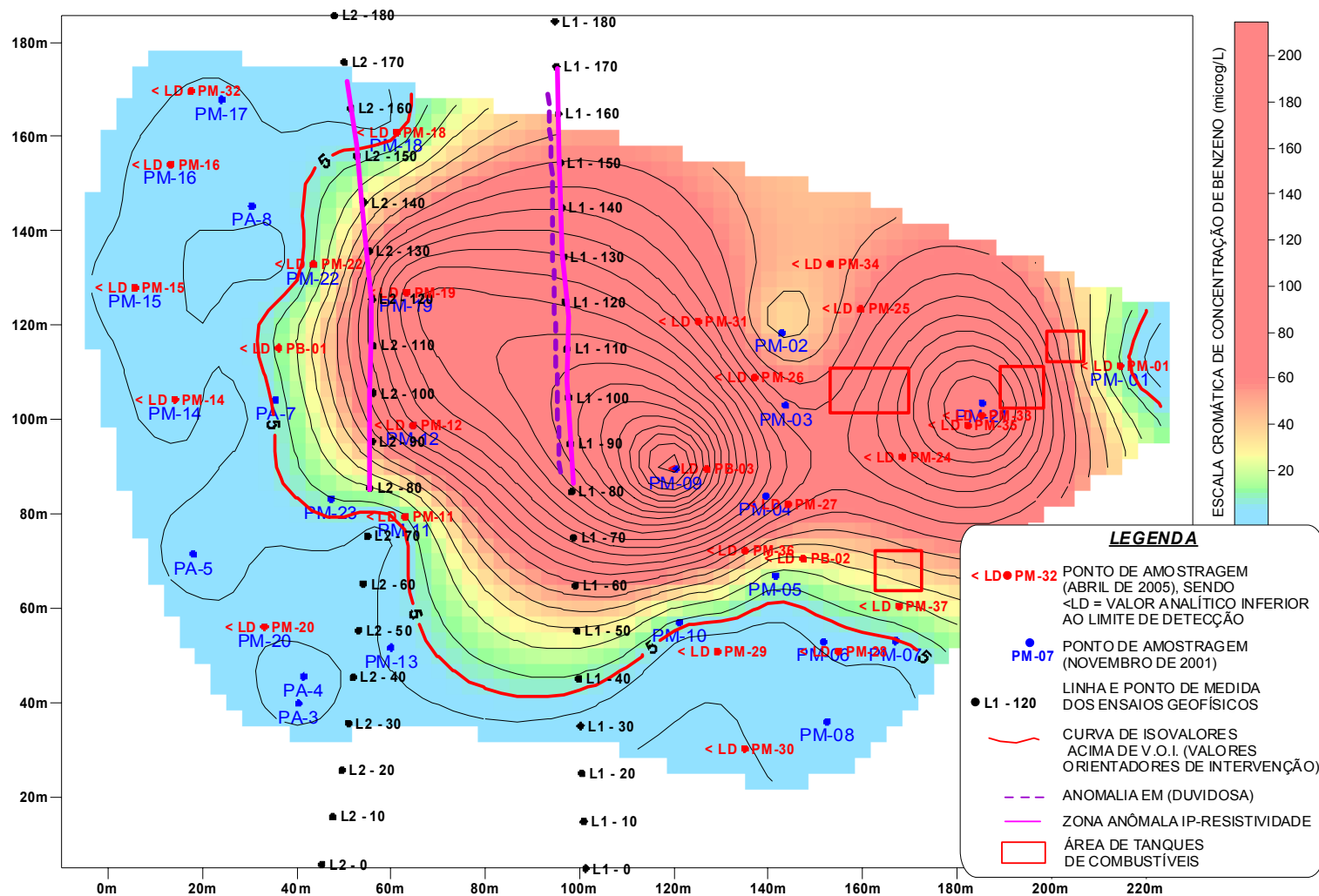


Figura 33 – Mapa de concentração de benzeno em 2001 e 2005.

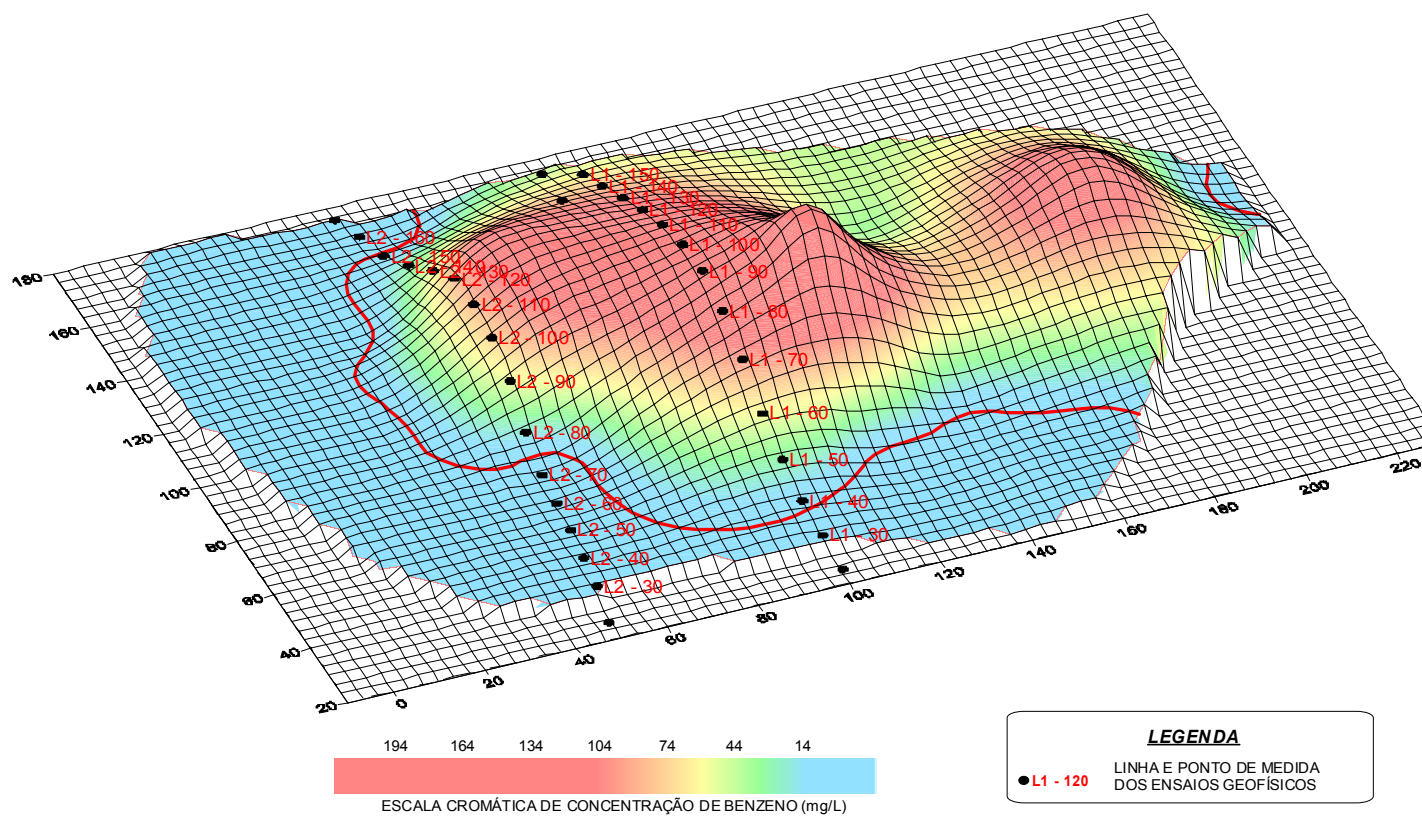


Figura 34 – Simulação 3-D da concentração de benzeno em 2001 e 2005.

8 – CONCLUSÃO

A literatura estudada apresentou duas tendências diferentes nos resultados obtidos na detecção de plumas antigas de hidrocarbonetos, apresentando-se ora como anomalia de alta resistividade e ora como baixa resistividade. A baixa resistividade seria decorrente dos efeitos da biodegradação, embora em alguns locais a biodegradação possa ser retardada pelo confinamento de aquíferos por lentes de argila ou pelas próprias reações biogeoquímicas deste tipo de situação.

A partir disto, quando se emprega a geofísica na detecção de plumas de hidrocarbonetos é inadequado pressupor a direção dos resultados nas respostas elétricas e eletromagnéticas dos contaminantes, pois eles se relacionam com as variáveis de cada situação, tipo de hidrocarbonetos e suas associações. Da mesma maneira, a característica condutiva ou resistiva de uma pluma antiga não estaria ligada à sua idade, mas a possibilidade de haver ou não biodegradação no local.

Adicionalmente, nos trabalhos nacionais deve ser considerado o alto teor de etanol adicionado à gasolina, que inibe a biodegradação, além de aumentar a solubilidade e mobilidade dos compostos BTEX dissolvidos na água subterrânea. Além disso, como a saturação de hidrocarboneto não é 100% contínua, os vazios podem criar espaço ideal para o desenvolvimento de microorganismos biodegradadores.

Neste trabalho, em que se considera o vazamento como antigo, contrapondo-se ao modelo vigente em solos arenosos, foi encontrada pluma contaminante resistiva, provavelmente devido ao solo local ser fino, o que poderia provocar aderência do hidrocarboneto à superfície do grão, dificultando a mobilidade dos íons e conseqüentemente ocasionando uma região mais resistiva.

Dos quatro métodos utilizados para detecção da contaminação, a eletrorresistividade principalmente, e a polarização induzida secundariamente, foram os que apresentaram maior correlação entre si (Figuras 17 a 20) e na comparação com os dados químicos (Figuras 31 a 34).

A alta resistividade da anomalia associou-se a resultados altos de polarização induzida. Supondo que houve, com o passar do tempo, uma menor disponibilidade de íons presentes, isto corrobora estudos em que menores concentrações iônicas acarretam maiores cargabilidades (IP).

Ressalta-se que o processamento dos dados químicos por análise multivariada facilitou a comparação com as anomalias IP - resistividade. As anomalias geoquímicas (principalmente benzeno) são praticamente restritas ao ano de 2001, quase desaparecendo em 2005. Uma vez que a coleta de dados geofísicos aconteceu no final de 2004 (IP e resistividade) e princípio de 2005 (EM e GPR), antes da coleta das amostras nos poços, somente com o uso deste recurso pôde-se estabelecer a correlação.

A julgar pelos resultados das análises químicas de 2005, as águas freáticas quase não apresentam contaminação. Assim sendo, as anomalias IP e resistividade devem ser relacionadas a níveis mais superficiais correspondentes às oscilações da franja capilar e que estariam retendo os contaminantes em seus poros, sendo uma fonte residual de contaminação.

O método georradar não apresentou resultados correlacionáveis à contaminação, pois a antena escolhida possibilitou profundidade de investigação da ordem de 3m, enquanto o nível freático situava-se a mais de 5m, inviabilizando a detecção da contaminação na água subterrânea.

O método eletromagnético praticamente também não apresentou respostas correlacionáveis à contaminação local, à exceção, talvez, da pequena diminuição da condutividade coincidente com a elevação da resistividade, verificada na linha 1 (Figura 26). É provável que, atualmente, a zona contaminada esteja restrita aos poros da franja capilar.

Finalmente, vale lembrar que o parâmetro químico em que se verificou o maior número de poços com valores acima dos V.O.I. (Valores Orientadores de Intervenção) foi o benzeno. De acordo com o histórico do posto Gigio, os vazamentos foram de óleo diesel e como este hidrocarboneto está presente na gasolina, supõe-se que também houve vazamento de gasolina na área.

ANEXO 1 – CONCENTRAÇÕES DE COMPOSTOS BTEX E PAH NA ÁGUA SUBTERRÂNEA (NOVEMBRO DE 2001)

PARÂMETROS	POÇOS												
	PM-01	PM-02	PM-03	PM-04	PM-05	PM-06	PM-07	PM-08	PM-09	PM-10	PM-11	PM-12	PM-13
Benzeno	1,5	30,0	68,0	95,0	9,5	1,6	1,3	1,4	217	2,3	2,0	95	<0,3
Tolueno	1,5	1,7	2,0	1,6	4,3	1,5	<0,3	<0,3	5,7	1,4	2,0	1,6	<0,3
Etilbenzeno	2,5	3,6	21,0	3,8	13,0	2,7	<0,3	<0,3	23,0	2,8	2,7	3,3	<0,3
Xilenos	3,9	49,0	126,9	8,1	66,0	4,9	2,0	2,0	306	8,2	6,4	70,0	<0,3
Acenafteno	0,89	0,89	10,19	1,27	<0,01	<0,01	0,02	0,01	10,24	0,10	<0,01	2,38	<0,01
Acenaftileno	0,08	<0,01	0,86	0,33	<0,01	<0,01	0,09	<0,01	5,00	0,03	<0,01	0,89	<0,01
Antraceno	<0,01	<0,01	3,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,01	1,88	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(a)antraceno	0,02	<0,01	1,13	<0,01	0,11	<0,01	0,03	<0,01	0,64	<0,01	0,03	0,14	<0,01
Benzo(a)pireno	<0,01	<0,01	1,15	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,4	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(b)fluoranteno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(ghi)perileno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(k)fluoranteno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Criseno	0,06	0,03	4,68	0,45	0,38	0,04	0,09	0,03	3,03	0,02	0,15	0,74	<0,01
Dibenzo(a,h)antraceno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Fenantreno	1,44	6,85	60,62	2,87	5,51	<0,01	0,14	0,02	33,18	0,28	<0,01	9,58	<0,01
Fluoranteno	<0,01	<0,01	0,55	0,11	0,91	<0,01	0,02	<0,01	1,12	<0,01	<0,01	0,22	<0,01
Fluoreno	1,23	5,46	20,87	2,66	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	17,82	0,36	<0,01	5,81	<0,01
Indeno(1,2,3-cd)pireno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Naftaleno	<0,01	182,53	94,89	28,38	7,41	0,08	<0,01	0,03	228,86	1,07	0,08	70,13	<0,01
Pireno	0,10	0,08	4,36	0,39	2,16	0,06	0,08	0,02	3,44	0,02	0,35	0,6	<0,01

PARÂMETROS	POÇOS												
	PM-14	PM-15	PM-16	PM-17	PM-18	PM-19	PM-21	PM-22	PA-03	PA-04	PA-05	PA-07	PA-08
Benzeno	1,5	1,7	1,5	1,6	1,5	126	158	2,3	1,6	1,5	1,6	1,7	1,6
Tolueno	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	2,6	16,0	<0,3	12,0	1,4	<0,3	1,8	2,4
Etilbenzeno	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	3,8	38,0	2,7	2,5	<0,3	2,8	3,0	2,6
Xilenos	1,8	4,4	1,8	<0,3	<0,3	317	145	6,0	3,8	<0,3	<0,3	4,2	4,8
Acenafteno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	4,08	40,91	1,50	0,01	<0,01	<0,01	1,63	1,09
Acenaftileno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,12	4,08	1,00	<0,01	<0,01	<0,01	8,03	<0,01
Antraceno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	12,07	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(a)antraceno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,15	6,97	0,22	<0,01	<0,01	<0,01	0,08	0,28
Benzo(a)pireno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	4,21	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(b)fluoretano	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(ghi)perileno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(k)fluoranteno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Criseno	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,90	27,89	1,19	<0,01	<0,01	<0,01	0,40	1,62
Dibenzo(a,h)antraceno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Fenantreno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,08	15,27	534,09	24,22	0,01	<0,01	0,02	4,0	9,79
Fluoranteno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,16	6,51	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Fluoreno	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	0,03	7,91	93,06	3,16	<0,01	<0,01	<0,01	3,98	2,19
Indeno(1,2,3-cd)pireno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Naftaleno	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	0,14	113	162,61	37,7	0,07	0,13	0,05	1,49	5,89
Pireno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	1,20	26,12	1,07	0,01	<0,01	<0,01	0,90	2,65

Fonte: CETESB Processos nº PA- 60/00078/03, V.I Auto Posto Gigio Ltda – Relatório Servmar Instaladora Assessoria Ambiental Ltda – nov/01

Observação: Os valores em negrito são maiores que os valores de referência da Cetesb de dezembro de 2005.

ANEXO 2 - CONCENTRAÇÕES DE COMPOSTOS BTEX E PAH NO SOLO (NOVEMBRO DE 2001)

PARÂMETROS	SONDAGENS (A TRADO)											
	ST-01		ST-02		ST-03		ST-04		ST-05		ST-06	
	3,0m	4,0m	6,0m	7,0m	1,0m	2,0m	1,0m	2,0m	1,0m	8,0m	1,0m	5,0m
Benzeno	0,458	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Tolueno	1,512	0,456	0,128	0,450	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	1,028	<0,025	<0,025
Etilbenzeno	<0,025	0,100	0,062	0,049	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	0,161	<0,025	<0,025
Xilenos	4,356	0,684	0,150	0,724	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	0,803	<0,025	<0,025
Acenafteno	0,241	0,183	0,150	0,332	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0006	0,06512	<0,0005	0,1074
Acenaftileno	<0,0005	0,1504	0,0677	0,3296	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,1926	<0,0005	0,1565
Antraceno	<0,0005	0,1004	0,0551	0,0919	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0006	<0,0005	<0,0005	0,9388
Benzo(a)antraceno	0,1308	0,0224	0,0188	0,0315	0,0008	0,0013	0,0007	0,0007	0,0012	0,0110	<0,0005	0,0107
Benzo(a)pireno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0010	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Benzo(b)fluoretano	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0006	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Benzo(ghi)perileno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0008	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Benzo(k)fluoranteno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Criseno	0,5932	0,1448	0,0985	0,1699	0,0014	0,0017	0,0009	0,0007	0,0031	0,0621	0,0015	0,0591
Dibenzo(a,h)antraceno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Fenantreno	12,7233	1,5092	0,8823	1,5942	0,002	0,0038	0,0035	0,0031	0,0093	0,7968	0,0047	0,8431
Fluoranteno	0,4503	0,0251	0,0172	0,0233	0,0009	0,0011	0,0011	0,0007	0,0016	0,0099	0,0009	0,0076
Fluoreno	0,5329	0,3777	0,2941	0,6452	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0018	0,2341	0,0008	0,2429
Indeno(1,2,3-cd)pireno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Naftaleno	3,4410	1,1184	0,1977	2,6572	<0,0005	0,0018	0,0021	0,0019	0,0158	0,8412	0,0171	0,7034
Pireno	1,3036	0,1467	0,1254	0,1639	0,0011	0,0010	0,0012	0,0008	0,0023	0,0613	0,0011	0,0576

PARÂMETROS	SONDAGENS (A TRADO)									
	ST-07		ST-08		ST-09		ST-10	ST-11	ST-12	
	4,0m	5,0m	2,0m	4,0m	3,0m	4,0m	4,0m	5,0m	2,0m	4,0m
Benzeno	<0,025	<0,025	<0,025	0,058	0,057	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Tolueno	<0,025	<0,025	<0,025	0,433	0,106	0,372	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Etilbenzeno	<0,025	<0,025	<0,025	0,127	0,024	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Xilenos	<0,025	<0,025	<0,025	0,952	0,529	0,786	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Acenafteno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0347	0,115	0,0308	0,0173	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Acenaftileno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0780	0,3733	<0,0005	0,0473	0,1633
Antraceno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0487	<0,0005	0,2419	<0,0005	0,0054	0,0093
Benzo(a)antraceno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,9076	<0,0005	0,0492	0,0700
Benzo(a)pireno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,8778	<0,0005	0,0559	0,0839
Benzo(b)fluoretano	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,6534	<0,0005	0,0417	0,0617
Benzo(ghi)perileno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,8221	<0,0005	0,0640	0,0809
Benzo(k)fluoranteno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,7623	<0,0005	0,0523	0,0816
Criseno	0,001	0,0006	0,0007	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,9858	0,001	0,0518	0,0862
Dibenzo(a,h)antraceno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0637	<0,0005	0,0115	0,0125
Fenantreno	0,0041	0,0013	0,0011	0,4320	1,2162	0,1832	1,3173	0,0013	0,0188	0,0376
Fluoranteno	0,0016	0,0007	0,0007	<0,0005	<0,0005	<0,0005	1,9584	0,0012	0,0742	0,1305
Fluoreno	0,0006	<0,0005	<0,0005	0,0854	0,2716	0,0702	0,0625	0,0008	0,0014	<0,0005
Indeno(1,2,3-cd)pireno	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,8448	<0,0005	0,0664	0,0807
Naftaleno	0,0179	<0,0005	<0,0005	0,7866	0,5103	0,330	0,3004	0,0324	0,0377	0,0555
Pireno	0,0015	<0,0005	<0,0005	0,0278	0,1462	0,017	1,7695	0,0005	0,0694	0,1222

Fonte: CETESB Processos nº PA- 60/00078/03, V.I Auto Posto Gigio Ltda – Relatório Servmar Instaladora Assessoria Ambiental Ltda – nov/01

Observação: Os valores em negrito são maiores que os valores de referência da Cetesb de dezembro de 2005

PARÂMETROS	POÇOS														
	PM-27	PM-28	PM-29	PM-30	PM-31	PM-32	PM-33	PM-34	PM-35	PM-36	PM-37	PB-01	PB-02	PB-03	
Benzeno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Tolueno	16	14	11	44	12	< LD	48	1960	17	9	< LD	< LD	< LD	< LD	
Etilbenzeno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	24	487	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Xilenos	< LD	21	19	< LD	< LD	< LD	72	5430	< LD	17	96	< LD	< LD	< LD	
Acenafteno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Acenaftileno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Antraceno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Benzo(a)antraceno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Benzo(a)pireno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Benzo(b)fluoretano	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Benzo(ghi)perileno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Benzo(k)fluoranteno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Criseno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	7	72	< LD	< LD	19	< LD	< LD	< LD	
Dibenzo(a,h)antraceno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Fenantreno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	5	14	< LD	< LD	5	< LD	< LD	< LD	
Fluoranteno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Fluoreno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Indeno(1,2,3-cd)pireno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Naftaleno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	
Pireno	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	25	242	< LD	< LD	66	< LD	< LD	< LD	

Fonte: CETESB Processos nº PA- 60/00337/05 Auto Posto Gigio Ltda – Relatório Miller Consultoria Ambiental Ltda – ago/05

Observação: Os valores com um traço, não foram investigados.

ANEXO 4 - VALORES ORIENTADORES DE INTERVENÇÃO PARA SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA - VOI (USO RESIDENCIAL)

SUBSTÂNCIA	Solo	Água Subterrânea
Benzeno	0,08	5
Etilbenzeno	40	300
Tolueno	30	700
Xileno	30	500
Benzo(a)antraceno	20	1,75
Benzo(a)pireno	1,5	0,70
Dibenzo(a,h)antraceno	0,6	0,18
Fenantreno	40	140
Indeno(1,2,3-cd)pireno	25	1,75
Naftaleno	60	140

Fonte: Cetesb - novembro 2005

ANEXO 5 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO, BOMBEAMENTO E INJEÇÃO.

DADOS	OUTUBRO 1999			NOVEMBRO 2001			OUTUBRO 2002	MAIO 2005			
	Poço	Cota Poço	Nível Água (m)	Carga Hidráulica (m)	Produto Fase livre (m)	Nível Água (m)	Carga Hidráulica (m)	Produto Fase livre (m)	Produto Fase livre (m)	Nível Água (m)	Carga Hidráulica (m)
PM- 01	99,961	3,695	96,27	-	6,52	93,4	-	-	3,68	96,28	-
PM-02	99,300	6,89	92,41	-	8,92	90,4	-	-	seco	-	-
PM-03	99,320	7,310	92,01	0,020	9,01	90,3	-	-	seco	-	-
PM-04	99,156	8,205	90,95	0,005	9,42	89,7	-	-	seco	-	-
PM-05	99,288	8,53	90,77	0,055	9,88	89,4	-	-	seco	-	-
PM-06	99,677	8,449	91,23	0,015	9,86	89,8	-	-	seco	-	-
PM-07	99,738	7,155	92,59	0,015	9,80	90,1	-	-	seco	-	-
PM-08	99,348	8,35	91,00	-	9,85	89,5	-	-	seco	-	-
PM-09	98,908	8,515	90,40	0,020	9,60	89,3	-	-	seco	-	-
PM-10	99,166	9,10	90,07	-	10,17	89,0	-	-	seco	-	-
PM-11	92,135	5,95	86,19	-	5,75	86,4	-	-	5,92	86,21	-
PM-12	93,372	6,685	86,69	-	6,65	86,7	-	-	6,79	86,58	-
PM-13	88,927	3,01	85,92	-	2,74	86,2	-	-	-	-	-
PM-14	87,796	1,92	85,88	-	1,68	86,1	-	-	1,83	85,97	-
PM-15	87,417	1,54	85,88	-	1,30	86,1	-	-	1,33	86,09	-
PM-16	88,049	2,20	85,85	-	1,90	86,1	-	-	2,02	86,03	-
PM-17	88,302	2,455	85,85	-	2,24	86,1	-	-	-	-	-
PM-18	94,493	7,755	86,74	-	7,85	86,6	-	-	-	-	-
PM-19	94,190	7,49	86,70	-	7,75	86,4	0,015	-	7,82	82,60	-
PM-20	87,220	1,61	85,61	-	1,00	86,2	-	-	1,15	86,07	-
PM-21	99,767	3,669	96,10	0,015	-	-	-	0,360	-	-	-
PM-22	90,332	4,22	86,11	-	4,40	86,3	-	-	4,52	85,90	-

PM-23	89,528	3,45	86,08	-	-	-	-	-	-	-	-
PM-24	99,736	-	-	-	-	-	-	-	8,52	91,22	-
PM-25	99,268	-	-	-	-	-	-	-	9,45	89,82	-
PM-26	99,108	-	-	-	-	-	-	-	10,51	88,60	-
PM-27	99,007	-	-	-	-	-	-	-	10,38	88,63	-
PM-28	99,389	-	-	-	-	-	-	-	12,60	86,79	-
PM-29	98,936	-	-	-	-	-	-	-	10,41	88,53	-
PM-30	98,997	-	-	-	-	-	-	-	12,13	86,87	-
PM-31	98,351	-	-	-	-	-	-	-	9,32	89,03	-
PM-32	87,828	-	-	-	-	-	-	-	1,98	85,85	-
PM-33	99,767	-	-	-	-	-	-	-	6,25	93,52	-
PM-34	-	-	-	-	-	-	-	-	8,37	-	-
PM-35	-	-	-	-	-	-	-	-	6,00	-	-
PM-36	-	-	-	-	-	-	-	-	11,07	-	-
PM-37	-	-	-	-	-	-	-	-	12,79	-	-
PM-38	-	-	-	-	-	-	-	-	10,20	-	-
PM-39	-	-	-	-	-	-	-	-	10,24	-	-
PB-01	89,188	-	-	-	-	-	-	-	3,15	86,04	-
PB-02	98,405	-	-	-	-	-	-	-	11,13	87,28	-
PB-03	95,580	-	-	-	-	-	-	-	10,24	85,34	-
PI-01	87,720	-	-	-	1,20	86,5	-	-	-	-	-
PB-01	89,188	3,139	86,05	0,005	3,00	86,2	-	-	-	-	-
PB-02	99,405	8,195	91,21	0,005	9,60	89,8	-	-	-	-	-
PB-03	98,578	8,01	90,57	-	9,18	89,4	-	-	-	-	-

Fonte: CETESB Processos nº PA- 00222x98 (1998); 60/00078/03, V. I e V.II (2003 a 2004) e, 60/00337/05 Auto Posto Gigio Ltda.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AAL, G.Z.A.; SLATER L.D.; ATEKWANA E.A. 2006 - Induced polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. *Geophysics*, Oklahoma, v. 71, n.2, p. 1-12.

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. 1984 - *O Pré-cambriano no Brasil*. São Paulo, Editora Edgard Bücher Ltda. 378 p.

ANNAN, P.A. 1992 - Uses and Techniques of Ground Penetrating Radar in Near Surface. *Society of Exploration Geophysicists Workshop Notes*, Sensor & Software Inc., 110p.

ANP 2007 – Agência Nacional de Petróleo – www.anp.gov.br – acessado em 19 junho2007

API Interactive LNAPL Guide 2004 .acessado de <http://api-ec.api.org/>, em novembro de 2004.

ATEKAWANA, E.A.; SAUCK, W.A.; WERKEMA, D.D. 2000 - Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated sites. *Journal of Applied Geophysics*, Amsterdam, v. 44, n.2, p. 167-180.

AZAMBUJA, E.; COSTA, A.F.U.; NANNI, A.S. 1999 - O emprego da prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação por hidrocarbonetos. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, São José dos Campos, 1999.

BATAYNEH, A.T. 2005 - 2D Electrical Imaging of an LNAPL Contamination, Al Amiriyya Fuel Station, Jordan. *Journal of Applied Sciences*, Pakistan, v. 5, n.1, p. 52-59.

BENSON, R.C.; NOEL, M. 1984 - *Geophysical Techniques for sensing buried wastes and waste migration* (NTIS PB84-1984449) In: U.S.EPA Environmental Monitoring Systems Laboratory, Las Vegas, 236 p.

BERTIN, J.; LOEB, J. 1976 - Experimental and theoretical aspects of induced polarization. *Geopublicaton Associates*, Berlim, v.1, 250 p.

BRAGA, A.C.O.; CARDINALLI, M.T. 2005 - Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação por derivados de hidrocarbonetos. *Revista Brasileira de Geofísica*. Rio de Janeiro, v.23, p. 181-190.

CALABRESE, E.J.; KOSTECKI, P.T. 1991 - *Hydrocarbon contaminated soils and groundwater*. Lewis Publishers, Inc. Chelsea. 547 p.

CARVALHO, R.A., LEPSCH, L.F.; OLIVEIRA, J.B.; VALADARES, J. 1975 – Levantamento pedológico semidetalhado do município de Atibaia, S.P. *Bragantina São Paulo* 58p.

CASSIDY, D.P.; WERKEMA, D.D.; SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.; ROSSBACH, S.; DURIS, J. 2001 - The Effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements. *JEEG Journal of Environmental and Engineering Geophysics Publications*, Denver, v.6, n.1, p. 47-52.

CASTRO, D.L.; BRANCO, R.M.G.C. 2003 - 24-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *Journal of Applied Geophysics*, Amsterdam, v. 54, n.1-2, p.127 – 144.

CAVALCANTE, I.N.; SANTIAGO, M.M.F.; REBOUÇAS, A.C. 1998 - Hidroquímica dos sistemas aquíferos manto de intemperismo e meio fraturado na região de Atibaia, Estado de São Paulo. *Revista de Geologia*. Fortaleza, v. 11, p. 31-39.

CETESB 1999 - Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas – capítulo Métodos Geofísicos. São Paulo, CETESB.

CETESB Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental 2003 - *Relatório do Auto Posto Gigio Ltda* In: Processo nº 60/00078/03. Campinas. v.1.

CETESB 1999 - Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas – capítulo Métodos Geofísicos. São Paulo, CETESB.

CETESB 2006 - Procedimento para a Identificação de Passivos Ambientais em Estabelecimentos com Sistemas de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC -). São Paulo, CETESB).

CORSEUIL, H.X.; MARINS, M.D.M. 1997 - Contaminação de Águas Subterrâneas por Postos de Combustíveis: O problema é grave?. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.2, n.2, p. 50-54.

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

DANIELS, J.J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. 1995 - Ground penetrating radar for the detection of liquids contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, Amsterdam, v.33, n.1, p.195 – 207.

DANIELS, J.J. 2000 - *Ground Penetrating Radar Fundamentals* In: APPENDIX TO REPORT TO THE U.S.EPA, REGION 5. Chicago.

DEHAINI, J. 2001 - *Detecção da pluma de contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração*. São Paulo, 174p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

DELANEY, A.J.; PEAPPLES, P.R.; ARCONE, S.A. 2000 - Electrical resistivity of frozen and petroleum contaminated fine-grained soil. *Cold Regions Science and Technology*, Ottawa, v.32, n. 2-3, p. 107-119.

ELIS, V.R. 2006 - A geofísica como ferramenta para detectar e mapear contaminação Material Básico: principais métodos geofísicos e aplicações. *VIII de Escola de Verão IAG USP*, São Paulo, p. 35.

EPA 1997 - Surface Geophysical Methods - chapter III, acessado em www.epa.gov/oust/pubs/esa-ch3.pdf, acessado em 2 de setembro de 2004.

EPA-542-R-00-003 – 2000 - Innovations in Site Characterization: Geophysical Investigation a Hazardous Waste Sites, acessado de <http://www.epa.gov/tio>, acessado em 3 de agosto de 2004

EPA 2003 . Overview of Federal Underground Storage Tank Program. Disponível em <http://www.epa.gov/swerust1/overview>, acessado em 18 de julho de 2003

FETTER, C.W. 1999 - *Contaminant Hydrogeology*. 2 ed. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. 500 p.

GALLAS, J. D.F. 2000 - Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Rio Claro, 174p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

GALLAS, J.D.F.; TAIOLI, F.; MALAGUTTI FILHO, W.; PRADO, R.L.; DOURADO, J.C. 2001 - Métodos e técnicas geoeletricos rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano. *Revista Brasileira Geofísica*, Rio de Janeiro, v.19, n.1.

GALLAS, J.D.F.; MALAGUTTI, W.; PRADO, R.L.; TAIOLI, F. 2003 - Lixão do Alvarenga – Mapeamento da Pluma de Contaminação pelos Métodos Geoeletricos. In: EIGHT INTERNATIONAL CONGRESS OF BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, Rio de Janeiro, 2003, *Sociedade Brasileira de Geofísica*.

GODIO, A.; NALDI, M. 2003 - Two-dimensional electrical imaging for detection of Hydrocarbon contaminants. *Near Surface Geophysics*, Washington, v. 1, n. 3, p. 131-137.

GROOT-HEDLIN & CONSTABLE 1990 - Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, v. 55(12), p. 1613-1624.

GUIGUER, N. 1996 - Poluição de Águas Subterrâneas e do Solo Causadas por Vazamentos em Postos de Abastecimento. Ontario, Waterloo Hydrogeology. 351p.

IAC/Ciiagro 2005 – Instituto Agrônomo - [www.iac.sp.gov.br/oagronomico/57_1/agronomico57\(1\).pdf](http://www.iac.sp.gov.br/oagronomico/57_1/agronomico57(1).pdf), acessado em 29 de agosto de 2005.

IBGE 2003 – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – www.ibge.gov.br, acessado em 17 de junho de 2007.

LORENZO, H.; ARIAS, P.; PEREIRA, M.; RIAL, F.; TEJEDA, A. 2004 - Use of GPR to map Prestige fuel layers below sand on the beaches of Galicia In: TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, Delft p.597-600.

LOKE & BARKER 1996 a, 1996b – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, v.44, p.131-152

MAZÁC, O.; BENES, L.; LANDA, I.; MASKOVA, A. 1990 - Determination of the extent of oil contamination in groundwater by geoelectrical methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Oklahoma, v.2, p.107-112.

NOBES, D.C. 1996 - Troubled Waters: Environmental Applications of Electrical and Electromagnetic Methods. *Surveys in Geophysics*, Netherlands, v. 17, n. 4, p.393 – 454.

OLHOEFT, G.R. 1992 - Geophysical Detection of Hydrocarbon and Organic Chemical Contamination In: PROCEEDINGS ON APPLICATION OF

GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEM, Oakbrook, p. 587-595.

OLHOEFT, G.R. 1998 - Electrical, Magnetic, and Geometric Properties that determine ground penetrating radar performance In: PROCEEDINGS OF GPR'98, SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR. Kansas, p. 177-182.

OLHOEFT, G.R. 1999 - Applications and Frustrations in using ground penetrating radar. In: PROCEEDINGS ULTRA WIDEBAND CONFERENCE, Washington, p. 27-29.

OLIVEIRA, E. 1992 - *Contaminação de Aquíferos por Hidrocarbonetos Provenientes de vazamentos de tanques de Armazenamento Subterrâneo*. São Paulo, 112p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

ORELLANA, E. 1972 - *Prospeccion geoeletrica em corrente continua*. Madrid, Paraninfo. 523p.

PARASNIS, D.S. 1986 - *Principles of Applied Geophysics*. 5ed. New York, Chapman and Hall. 402p.

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 do Solo (GPR) *Revista de Geologia* v.18, n.2, p. 189-202.

RUSSEL, J.B. 2004 - *Química Geral*. 2 ed. São Paulo, Pearson Makron Books. v.1, 527p.

SAUCK, W.A.; ATEKAWANA, E.; NASH, M. 1998 - High Conductivities associated with LNAPL plume imaged by integrated by geophysical techniques. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics Publications*, Colorado, v.2, n.3, p. 203.

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

SPIES, B.R.; FRISCHKNECHT, F.C. 1991 - Electromagnetic methods in applied Geophysics – applications. *Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, p.285-386.

SUMNER, J.S. 1976 - *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. New York, Elsevier Scientific Publishing Company. 277p.

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

WERKEMA, D.D.J; ATEKWANA, E.A.; ENDRES, A.; SAUCK, W.A. 2002 - Temporal and spatial variability resolutions in situ vertical apparent resistivity measurements at a LNAPL impacted site In: PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON THE APPLICATIONS OF GEOPHYSICS TO ENVIRONMENTAL AND ENGINEERING PROBLEMS SAGEEP 2002. Las Vegas.

WIKIPÈDIA Köppen climate classification http://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6ppen_climate_classification, acessado em 29 de abril de 2006.

