



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E
CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS NA AVALIAÇÃO AMBIENTAL EM UMA
INDÚSTRIA QUÍMICA NA CIDADE DE SÃO PAULO - SP

MARINA MINOZZO

JUNHO
2009

MARINA MINOZZO

**MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS NA AVALIAÇÃO AMBIENTAL EM UMA
INDÚSTRIA QUÍMICA NA CIDADE DE SÃO PAULO - SP**

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

Área de Concentração: Geofísica Aplicada
Orientador: Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

São Paulo
2009

Minozzo, Marina

Métodos Geofísicos Aplicados na Avaliação Ambiental em uma Indústria Química na cidade de São Paulo – SP / Marina Minozzo; orientador: Vagner Roberto Elis.

São Paulo, 2009

114 p. ; 63 fig.

Tese (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geofísica. Área de Concentração: Geofísica Aplicada) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

1. Geofísica. 2. meio ambiente. 3. contaminação

Dissertação apresenta ao Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de Mestre.
Área de Concentração: Geofísica Aplicada

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Aos meus pais Sadi e Ivanete que abriram as portas para que eu seguisse em frente e sempre me encorajaram a seguir pelo melhor caminho, com muita responsabilidade e amor.

Ao meu amado Felipe, que me faz rir, me faz chorar e todos os dias faz de mim a pessoa mais feliz deste mundo.

Ao meu querido irmão Mauricio, de quem eu tenho tanto orgulho, tanta saudade e tanto amor.

Aos meus inigualáveis avós, que através de gestos simples, fortes exemplos e enormes sorrisos sempre me deram o maior amor do mundo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Vagner Roberto Elis, pela orientação, apoio, amizade, respeito e por ter conseguido passar sua calma e confiança, mesmo nos momentos mais complicados e difíceis.

Ao Prof. Dr. Jorge Luis Porsani, pela grande contribuição através de críticas e sugestões à pesquisa.

Ao técnico da Geofísica Aplicada Ernande Costa Santos pela fundamental ajuda no trabalho de campo.

Ao Departamento de Geofísica do IAG pela oportunidade e estrutura oferecida.

Ao Sr. Alexandre Olio, e demais funcionários, por terem permitido o desenvolvimento deste trabalho na área da indústria.

A todos os professores do IAG, que contribuíram para minha formação acadêmica.

A todos os funcionários do IAG.

A colega Andréa Teixeira Ustra, pela amizade, pela grande contribuição através das discussões e sugestões, pela fundamental ajuda nos trabalhos de campo e interpretação dos dados.

Aos colegas Sérgio Fachin e Fábio Missaki pela grande contribuição para a realização do trabalho com a ajuda no trabalho de campo, fornecimento de dados, discussões e sugestões.

A todos os colegas do programa de pós-graduação em geofísica do IAG, pela amizade, discussões e ajuda.

As queridas e fundamentais mulheres que fazem parte da minha vida: Bárbara, Bia, Daiane, Cintia, Deise, Ieda, Ivone, Maíra. Obrigada pelo carinho, amizade, respeito e pelo imenso amor.

Aos queridos Antônio Oliveira e Márcia Brito, obrigada por terem me recebido de maneira tão especial e por terem me ajudado tanto na adaptação nesta nova terra.

Aos meus queridos avós Alcides, Delvina, Domingos e Gema que me ensinaram que sobre uma base sólida (feita de amor e carinho) pode ser construído tudo.

Ao meu querido Felipe que contribuiu imensamente para que esse trabalho pudesse ser feito. Obrigada pelo carinho, amizade, amor, respeito, paciência, ...

Aos meus pais e meu irmão que me proporcionaram a vida mais rica que eu poderia ter.

RESUMO

Minozzo, M. *Métodos Geofísicos Aplicados na Avaliação Ambiental em uma Indústria Química na cidade de São Paulo – SP.* Dissertação (Mestrado). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG. Universidade de São Paulo – USP. 114 p. 2009.

O uso cada vez maior de derivados de petróleo em processos industriais proporciona a geração de uma diversidade de produtos cada vez mais utilizados pela sociedade atual. As conseqüências negativas do uso e manipulação de hidrocarbonetos é a geração de resíduos e efluentes altamente poluidores. Atualmente, a utilização integrada de técnicas geofísicas podem se constituir em uma ferramenta eficiente na avaliação e caracterização de problemas ambientais. De uma forma geral a utilização da geofísica na caracterização de uma área afetada por substâncias poluentes consiste na detecção e mapeamento da extensão da área afetada e informações sobre a profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo e profundidade do substrato rochoso inalterado. O objetivo principal deste trabalho foi a caracterização geofísica de uma área contaminada por hidrocarbonetos derivados de petróleo, por meio da utilização dos métodos: Eletroresistividade, Polarização Induzida e Eletromagnético Indutivo. Esta caracterização foi realizada através de ensaios de campo e do uso de modelos bidimensionais, tendo como área de estudo uma indústria química localizada no município de São Paulo – SP. Esta área foi escolhida com base em estudos precedentes que indicam a ocorrência de contaminação. Os resultados dos modelos de resistividade, cargabilidade e condutividade aparente sugerem a presença de contaminação e seu caminho preferencial, que segue o sentido do fluxo da água subterrânea. Três tipos de anomalias puderam ser individualizadas: a primeira, de baixa resistividade e baixa cargabilidade, que sugerem contaminação mais antiga e a relação com os processos de biodegradação, confirmada através das análises de bactérias; a segunda, de baixa resistividade e alta cargabilidade, geradas pela presença de materiais polarizáveis (metais); e a terceira, as anomalias de alta resistividade e baixa cargabilidade, geradas pela presença do contaminante bruto (sedimento impregnado por tinta), que confirma a contaminação mais recente onde não ocorre processo de biodegradação.

Palavras-chave: Eletroresistividade, Polarização Induzida (IP), Eletromagnético Indutivo (EM-34), contaminação, biodegradação, compostos orgânicos.

ABSTRACT

Minozzo, M. *Geophysical Methods applied in the Environmental Evaluation of a Chemical Industry in the city of São Paulo – SP.* Dissertation (Master Degree). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG). Universidade de São Paulo – USP. 114.p. 2009.

The increasing usage of petroleum derivatives in industrial processes provides a generation of products which are being increasingly used by the contemporary society. The negative consequence from the use and manipulation of hydrocarbons is the generation of residues and highly pollutant effluents. Nowadays, the integrated usage of geophysical techniques can become an efficient tool in the evaluation and characterization of environmental problems. In general, the usage of geophysical in the characterization of an area affected by pollutant substances consists in mapping and detecting the extension of the affected area and inform about the saturated zone deep, the underground flux direction and the deep of the unaltered rocky substrate. The main objective of this research was the geophysical characterization of contaminated area by hydrocarbons derived from petroleum, by the usage of the following methods: Electrical resistivity, Inducted Polarization, and Inductive Electromagnetic. This characterization was carried out through field rehearsals and the usage of two-dimensional models in a chemical industry as study area, placed in the city of São Paulo – SP. This area was chosen as the basis in precedent studies which has indicated the event of contamination. The results from the resistivity, chargeability and apparent conductivity models, suggest the presence of contamination and its favorable way, which follows the underground water flux. Three kinds of anomalies could be individualized: first, low resistivity and low chargeability, which suggest older contamination and the relation with the biodegradation processes, confirmed thought the bacterial analysis; second, low resistivity and high chargeability, generated by the presence of polarizable materials (metals); and third, the high resistivity anomalies and low chargeability, generated by the presence of the raw contaminant (paint impregnated sediment), which confirms the most recent pollution where the biodegradation process does not occur.

Key words: Electrical Resistivity, Inducted Polarization (IP), Electromagnetic Inductive (EM-34), contamination, biodegradation, organic composes

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Objetivos	3

CAPÍTULO 2

2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Geofísica	5
2.1.1	Método Eletromagnético Indutivo	7
2.1.2	Eletroresistividade e Polarização Induzida	8
2.2	Degradação no Meio Contaminado.....	9
2.2.1	Biodegradação de Hidrocarbonetos	11

CAPÍTULO 3

3	ÁREA DE ESTUDO	13
3.1	Caracterização Geológica Regional	16
3.2	Potenciometria	18

CAPÍTULO 4

4	METODOLOGIA	23
4.1	Método da Eletroresistividade	23
4.1.1	Fundamentos Teóricos	24
4.2	Método da Polarização Induzida (IP).....	28
4.2.1	Fontes dos Efeitos de Polarização Induzida.....	30
4.2.1.1	Polarização de Eletrodo	31
4.2.1.2	Polarização de Membrana.....	32
4.2.2	Aquisição dos dados de Resistividade e Polarização Induzida.....	33
4.2.2.1	Caminhamento Elétrico	35
4.2.3	Interpretação dos Dados.....	37
4.2.3.1	Interpretação Qualitativa	37
4.2.3.2	Interpretação Quantitativa	38
4.2.4	Fontes de Ruído da Eletroresistividade e Polarização Induzida	41
4.2.5	Fontes de Erro das Medidas de Eletroresistividade e Polarização Induzida.....	42
4.3	Método Eletromagnético Indutivo	43
4.3.1	Fundamentos Teóricos	44
4.3.2	Aquisição dos Dados Eletromagnéticos.....	47
4.4	Aquisição dos Dados Bacteriológicos.....	49

CAPÍTULO 5

5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	51
5.1	Dados Eletromagnéticos	52
5.2	Dados Elétricos	70
5.3	Dados Bacteriológicos	77

CAPÍTULO 6

6	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS.....	91

ANEXO I

	Seções Interpretadas de Resistividade e Cargabilidade das linhas de Caminhamento Elétrico	99
--	---	-----------

ANEXO II

	Boletins de Análise Bacteriológica.....	109
--	---	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Zonas de biodegradação de hidrocarbonetos (Adaptado de Rabus & Heider, 1998)	12
Figura 3.1 - Perímetro da indústria química alvo dos estudos (branco). A mesma se localiza na zona sul do município de São Paulo – SP, no bairro de Parelheiros, e está delimitada a oeste pela estrada de Jaceguava, a qual margeia a represa de Guarapiranga (tracejado azul).....	13
Figura 3.2 - Geologia regional da cidade de São Paulo (modificado de IPT, 1981).	19
Figura 3.3 – Mapa potenciométrico da área de estudo.	20
Figura 3.4 – Mapa potenciométrico tridimensional da área que engloba os poços de monitoramento.	21
Figura 4.1 - Um eletrodo na origem O de um sistema de coordenadas. S é a superfície de uma esfera de raio r (Ward, 1990).	24
Figura 4.2 - Eletrodo C em um ponto do semi-espaço e o fluxo radial de corrente.	25
Figura 4.3 - Distribuição das linhas corrente e potencial para dois eletrodos de corrente na superfície de um semi-espaço homogêneo.....	26
Figura 4.4 - Esquema de campo para determinação da resistividade.	27
Figura 4.5 - Formato da onda de corrente elétrica e a representação do efeito IP. Variação de ΔV em função do tempo, ilustrando o momento de interrupção da passagem de corrente elétrica e o retardamento da perda de voltagem (Modificado de Sumner, 1976; Braga, 1997 e Fachin 2007).	29
Figura 4.6 - Fluxo eletrolítico no poro superior e polarização de eletrodo no poro inferior. (modificado de Telford et. al., 1990).	31
Figura 4.7 - Efeito de polarização de membrana. a) Distribuição normal de íons em um arenito poroso; b) Polarização de membrana em um arenito poroso devido à aplicação de voltagem em corrente contínua (Adaptado de Telford et.al., 1990).	33
Figura 4.8 - Equipamento Iris Syscal R2, conversor de voltagem, e sistema de emissão e recepção, utilizado para a realização dos ensaios de eletroresistividade e caminhamento IP.....	34
Figura 4.9 - Disposição inicial no campo do arranjo dipolo-dipolo.	36
Figura 4.10 - Plotagem dos dados do arranjo de campo dipolo-dipolo, resultando em uma pseudo-seção.	38
Figura 4.11 - Rotina básica para um algoritmo de inversão de dados de resistividade elétrica (Adaptado de Narayan, et. al., 1994; Fachin, 2007).....	39
Figura 4.12 - Parte da rede de células bidimensional utilizada para a modelagem 2D, mostrando as posições dos eletrodos (modificado de Loke, 1999).....	40

Figura 4.13 - Eletrodos não polarizáveis (modificado de Ustra, 2008).....	42
Figura 4.14 - Princípio de indução eletromagnética. A bobina transmissora, energizada com uma corrente alternada, produz um campo magnético primário (H_p), que induz correntes secundárias no condutor em subsuperfície. A bobina receptora mede a resultante entre H_p e H_s (modificado de Sheriff, 1989).....	45
Figura 4.15 - Diagrama de respostas eletromagnéticas (modificado de Borges, 2007).....	46
Figura 4.16 - Seis configurações comuns de antenas dipolares: (a) horizontal coplanar, (b) vertical coplanar, (c) perpendicular, (d) vertical coaxial, (e) nula, (f) paralela (modificado de Borges, 2007).....	47
Figura 4.17 - Equipamento EM-34 composto por duas bobinas (transmissora e receptora), um módulo de controle e emissão de corrente elétrica, e um módulo de leitura.	48
Figura 4.18 - Foto mostrando a execução dos furos de sondagem com trado manual para a coleta das amostras de solo.....	50
Figura 4.19 - Foto mostrando que a cada nova amostra coletada o trado era devidamente lavado para evitar a contaminação de uma amostra para outra.	50
Figura 5.1 - Imagem mostrando a margem da represa, a área da indústria química e a área onde foram realizados os levantamentos eletromagnéticos.....	53
Figura 5.2 - Localização das linhas de caminhamento eletromagnético EM 00 a EM 05, na porção norte da área. Nota-se que a linha EM 04 foi realizada fora da área da indústria química.....	53
Figura 5.3 - Localização das linhas de caminhamento eletromagnético EM 06 a EM 08, executadas na porção leste da área industrial.....	54
Figura 5.4 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 00.....	55
Figura 5.5 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 01.....	55
Figura 5.6 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 02.....	56
Figura 5.7 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 03.....	57
Figura 5.8 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 4.1.....	59
Figura 5.9 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 4.2.....	58
Figura 5.10 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 05.....	58
Figura 5.11 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 06.....	60
Figura 5.12 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 07.....	60
Figura 5.13 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 08.....	61
Figura 5.14 - Localização das linhas de caminhamento eletromagnético EM 00 a EM 05, na porção norte da área. Notam-se as áreas construídas no interior da indústria, que impediram a continuidade de execução das linhas.....	62
Figura 6.15 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 7,5 metros.	63
Figura 5.16 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 7,5 metros, considerando a topografia da área. .	63
Figura 5.17 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 15 metros.	65

Figura 5.18 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 15 metros, considerando a topografia da área. ..	65
Figura 5.19 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 30 metros.	67
Figura 5.20 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 30 metros, considerando a topografia da área. ..	67
Figura 5.21 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 06 a EM 08, na profundidade de 7,5 metros	68
Figura 5.22 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 06 a EM 08, na profundidade de 15 metros.	69
Figura 5.23 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 06 a EM 08, na profundidade de 30 metros.	69
Figura 5.24 - Imagem mostrando a margem da represa, área da indústria química e a área onde foram realizados os levantamentos elétricos.	70
Figura 5.25 - Localização das linhas de caminhamento elétrico CE 01, CE 02 e CE 05, realizadas na porção norte da área. Nota-se que a linha CE 05 foi realizada fora da área da indústria química.	71
Figura 5.26 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha CE 01 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.	72
Figura 5.27 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha CE 02 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.	73
Figura 5.28 – Seção de resistividade elétrica para a linha CE 05 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.	74
Figura 5.29 - Localização das linhas de caminhamento elétrico CE 03 a CE 04, realizadas na porção leste da área.	75
Figura 5.30 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha CE 03 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.	76
Figura 5.31 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha CE 04 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.	76
Figura 5.32 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade da linha CE 01, indicando os locais onde foram feitas as sondagens SD-01 e SD-06 e coletadas as amostras.	78
Figura 5.33 - Solo retirado do furo de sondagem SD-01 com aspecto oleoso, coloração amarela e branca com forte cheiro de solvente. Na elipse vermelha, detalhe do pedaço de metal retirado do furo.	79
Figura 5.34 - Solo retirado do furo de sondagem SD-01 com aspecto oleoso, coloração amarela e branca com forte cheiro de solvente. Na elipse vermelha, detalhe do pedaço de tecido retirado do furo.	80
Figura 5.35 - Seção de resistividade elétrica e cargabilidade da linha CE 02, indicando o local onde foi feita a sondagem SD-02 e coletadas as amostras.	80
Figura 5.36 - Solo retirado do furo de sondagem SD-02 com coloração rósea e forte cheiro de solvente.	82
Figura 5.37 - Seção de resistividade elétrica e cargabilidade da linha CE 03, indicando o local onde foi feita a sondagem SD-03 e coletadas as amostras.	82

Figura 5.38 - Seção de resistividade elétrica e cargabilidade da linha CE 04, indicando o local onde foi feita a sondagem SD-04 e coletadas as amostras.....	84
Figura 5.39 - Seção de resistividade elétrica da linha CE 05, indicando o local onde foi feita a sondagem SD-05 e coletadas as amostras.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resultado das análises químicas de água subterrânea de alguns poços de monitoramento (modificado de Salles, 2005).	15
Tabela 4.1 - Arranjos eletródicos mais utilizados (modificado de Ustra, 2008).	35
Tabela 4.2 - Espaçamento entre bobinas, frequência de operação e profundidade de investigação de acordo com a disposição das bobinas.	48
Tabela 5.1 - Resultados analíticos das amostras SD-01 e SD-06, coletadas sobre o caminhamento elétrico CE 01, nas distâncias de 33 e 20 metros, respectivamente.	78
Tabela 5.2 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-01 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.	79
Tabela 5.3 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-06 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.	79
Tabela 5.4 - Resultados analíticos da amostra SD-02, coletada sobre o caminhamento elétrico CE 02, na distância de 37 metros.	81
Tabela 5.5 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-02 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.	81
Tabela 5.6 - Resultados analíticos da amostra SD-03, coletada sobre o caminhamento elétrico CE 03, na distância de 20 metros.	83
Tabela 5.7- Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-03 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.	83
Tabela 5.8 - Resultados analíticos da amostra SD-04, coletada sobre o caminhamento elétrico CE 04, na distância de 37 metros.	84
Tabela 5.9 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-04 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.	84
Tabela 5.10 - Resultados analíticos da amostra SD-05, coletada sobre o caminhamento elétrico CE 05, na distância de 60 metros.	85
Tabela 5.11 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-05 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.	86

ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
BTEX – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
CE – Caminhamento Elétrico
CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental
EM – Eletromagnético
EPA - United States Environmental Protection Agency
g - grama
IP – Induced Polarization
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LNAPL - Light Nonaqueous-phase Liquids
m – metro
NA – Nível d'água
NBR – Norma Brasileira
SEV – Sondagem Elétrica Vertical
UFC – Unidade Formadora de Colônia
°C – Graus Celsius

CAPÍTULO 1

1 Introdução e Objetivos

1.1 Considerações Gerais

As geociências vêm experimentando nos últimos anos um aumento de seu campo de atuação em função do desenvolvimento tecnológico, econômico e do crescimento da urbanização. Este aumento de atuação está relacionado, principalmente com a busca do equilíbrio entre o crescimento urbano e industrial e a preservação do meio ambiente.

Como consequência deste desenvolvimento urbano e industrial, o uso cada vez maior de derivados de petróleo em processos industriais proporciona a geração de uma diversidade de produtos cada vez mais utilizados pela sociedade atual. As consequências negativas do uso e manipulação de hidrocarbonetos é a geração de resíduos e efluentes altamente poluidores.

A destinação destes resíduos ou efluentes tem se apresentado como um dos principais problemas ambientais que vem sendo enfrentado nos últimos anos, pois muitas vezes não existem opções de reutilização, e o transporte e a disposição em locais adequados demandam elevados investimentos. Procedimentos inadequados resultam em ações danosas ao meio ambiente, como o descarte indevido, com graves consequências tanto ao solo quanto aos recursos hídricos subjacentes (rios e água subterrânea), sem falar do extenso passivo ambiental herdado de décadas de falta de planejamento e descaso com o meio ambiente. O diagnóstico e o monitoramento de áreas potencialmente contaminadas são necessários devido ao risco à saúde e a qualidade de vida da população.

Práticas como a infiltração ou descarte direto de resíduos no solo foram comumente adotadas, principalmente, na década de 70 e 80, uma vez que o desconhecimento das consequências de tais procedimentos, aliado aos conceitos equivocados de absorção e depuração a partir do solo, induziram o emprego destas ações. Outro aspecto agravante associado a este tipo de prática foi o

passivo ambiental estabelecido após a desativação de algumas indústrias: além dos riscos que permanecem, demandam elevados recursos a serem despendidos na sua remediação.

O aumento destes problemas ambientais ocorre juntamente com o aumento da conscientização do homem em relação ao meio ambiente. Faz-se necessária, então, a utilização de novas ferramentas de investigação que possibilitem análises rápidas e eficientes de áreas contaminadas juntamente com o aprimoramento das técnicas existentes, novos métodos de análise do comportamento e possibilidades de preservação do meio físico.

Por esses motivos, profissionais ligados às Ciências da Terra estão estimulados a pesquisar novos caminhos para estudar, avaliar e procurar novas soluções que possam minimizar os impactos ambientais causados por resíduos e a sua interação com o meio físico. Dentre esses caminhos pode ser enquadrado o uso de métodos geofísicos.

Sendo assim, a utilização integrada de técnicas geofísicas pode se constituir em uma metodologia eficiente na avaliação e caracterização de problemas ambientais. A natureza não invasiva dos métodos geofísicos (não afeta e não destrói camadas selantes naturais ou artificiais), aliada ao baixo custo operacional, rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios, torna-os particularmente adequados para aplicação no estudo de tais problemas. De uma forma geral a utilização da geofísica na caracterização de uma área afetada por substâncias poluentes consiste na detecção e mapeamento da extensão da área afetada e de informações sobre a profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo e profundidade do substrato rochoso inalterado.

Os métodos geofísicos apresentam vantagens em relação à amostragem direta, como por exemplo, custo e tempo de execução de ensaios muito menores. Entretanto, devido às ambiguidades inerentes a interpretação, os resultados não podem ser considerados definitivos e frequentemente se faz necessária a realização de amostragens diretas para validar a interpretação. Se devidamente aplicados, os levantamentos geofísicos podem otimizar as campanhas de investigação maximizando a área estudada e minimizando as necessidades de perfurações.

Uma justificativa ainda mais forte para a aplicação da geofísica, além das citadas acima, é que algumas técnicas fornecem dados contínuos sobre o local estudado, podendo, portanto, reduzir muito a necessidade de dados diretos e específicos, assim como permitem uma análise temporal e espacial mais detalhada.

1.2 Objetivos

Dentro desse contexto, esse projeto tem como finalidade a caracterização geofísica de uma área contaminada por hidrocarbonetos derivados de petróleo em uma indústria química por meio da utilização de diferentes métodos geofísicos. Os métodos geofísicos utilizados foram: Eletroresistividade, Polarização Induzida e Eletromagnético Indutivo.

Os métodos da eletroresistividade, polarização induzida e eletromagnético indutivo foram escolhidos devido a sua vasta e satisfatória aplicabilidade em estudos que envolvem problemas de contaminação ambiental.

Inúmeros estudos geofísicos que fizeram uso da eletroresistividade e polarização induzida relacionados a problemas ambientais como Elis & Zuquette (1996); Elis (1999); Atekwana et.al. (2000); Elis & Zuquette (2002); Silva et.al. (2002); Abdel et.al. (2003); Braga & Cardinali (2005); Moreira et.al. (2006), e que fizeram uso do método eletromagnético indutivo como Goldstein et.al. (1990); Elis (1999); Aquino (2000); Silva et.al. (2002); Moreira & Dourado (2005), mostraram que o uso destas metodologias de investigação são possíveis, de rápida aplicação, baixo custo financeiro e resultado satisfatórios.

Na área de estudo, objeto desta pesquisa, já foram realizados estudos e avaliações por Salles (1999 e 2005), onde análises químicas de poços de monitoramento confirmaram a contaminação com a presença de diversos produtos no solo e na água subterrânea.

Com base nos resultados obtidos, foi feita uma análise das vantagens e limitações dos métodos geofísicos utilizados. Essa análise mostra o potencial da metodologia geofísica integrada.

CAPÍTULO 2

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Geofísica

A Geofísica como ciência é caracterizada por se utilizar dos fenômenos físicos, naturais ou artificiais, que se manifestam no nosso planeta, a fim de investigar e compreender a subsuperfície terrestre, ou seja, a estrutura física e composição dos materiais geológicos no interior do planeta (Fachin, 2007).

Os métodos geofísicos são técnicas indiretas de investigação geológica, a partir da aquisição de dados instrumentais, geralmente dispostos na superfície, caracterizando-se, portanto, como métodos não invasivos ou não destrutivos (Jewell et.al., 1993).

Esta metodologia permite avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das propriedades físicas dos materiais em subsuperfície, por exemplo, condutividade ou resistividade elétrica, permissividade dielétrica, magnetismo, densidade, etc., e que podem ter como origem as diferenciações litológicas e outras heterogeneidades naturais ou não (CETESB, 1999).

Uma das principais vantagens da aplicação das técnicas geofísicas em relação aos métodos tradicionais de investigação de subsuperfície, como por exemplo, as sondagens, é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor. Além disso, os levantamentos geofísicos propiciam a execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação das variações laterais decorrentes com maior precisão como, por exemplo, mudanças litológicas ou mudanças originadas pela presença da contaminação subterrânea (Greenhouse & Harris, 1983).

No diagnóstico ambiental de áreas contaminadas, a realização de levantamentos geofísicos tem por objetivo básico a identificação da presença da contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

Em relação ao meio geológico, a interpretação dos dados geofísicos pode contribuir para a obtenção de informações sobre a litologia, estratigrafia, profundidade do nível d'água, profundidade

do embasamento, presença de falhas ou fraturas, existência de aquíferos importantes, caminhos preferenciais de propagação subterrânea e outras feições geológicas de interesse.

Na avaliação da presença da contaminação em profundidade, o emprego dos métodos geofísicos está voltado à, especificamente, localização de valas contendo resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de tanques e tanques enterrados, e determinação de vazamentos em tanques ou dutos (Gretsky et.al., 1990).

Segundo Greenhouse & Slaine (1986), decorrente da capacidade que as técnicas geofísicas possuem para detectar e mapear a contaminação do solo e das águas subterrâneas (pluma) é possível acompanhar a evolução da propagação dos contaminantes em subsuperfície através de medidas multitemporais.

As propriedades físico-químicas dos contaminantes, além das características geológicas e hidrogeológicas do meio, podem determinar o comportamento da contaminação em subsuperfície, sendo estes, também, os fatores decisivos na seleção das técnicas geofísicas a serem utilizadas. Além disso, a aplicação de dois ou mais métodos geofísicos distintos aumenta a precisão das interpretações (Nobes, 1996).

Os desvios significantes do padrão normal das medidas geofísicas (anomalias) podem, do ponto de vista ambiental, apontar a presença de contaminantes em subsuperfície. A interpretação das anomalias é de fundamental importância na investigação de áreas contaminadas, indicando a intensidade da poluição e orientando os trabalhos subsequentes de monitoramento da propagação dos contaminantes e da recuperação do local afetado (Gretsky et.al., 1990)

Desta forma, as informações derivadas dos levantamentos geofísicos são úteis para a locação dos poços de monitoramento como também podem fornecer estimativas de área e volume para as atividades de remoção e remediação de solos contaminados. Além disso, podem ser aplicadas para reduzir o risco de perfuração de tanques e tanques enterrados contendo resíduos, ou de dutos e galerias subterrâneas (Aquino, 2000).

A realização dos levantamentos geofísicos pode ser efetuada nas diferentes etapas de atividades estabelecidas para o gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB, 1999), e pode ser descrita da seguinte forma:

- Na etapa de investigação confirmatória, as técnicas geofísicas são utilizadas como métodos de rastreamento (*screening*) para localizar os pontos de amostragem mais adequados, através da determinação de anomalias que representam os locais com maiores concentrações de contaminantes (*hot spots*);

– Na investigação detalhada e na investigação para remediação, os métodos geofísicos podem ser empregados para o mapeamento e monitoramento da propagação da contaminação;

– Na fase de remediação de áreas contaminadas, estes métodos podem ser aplicados na avaliação da eficiência dos trabalhos de recuperação pela confirmação das reduções das concentrações dos contaminantes.

Existe uma variedade de métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos ambientais, porém os principais métodos que comumente são aplicados à investigação da contaminação do solo e da água subterrânea são o eletromagnético indutivo e a eletroresistividade (CETESB, *op. cit.*).

A vantagem destes métodos em relação aos principais métodos geofísicos consiste basicamente na capacidade de detecção direta da resposta da contaminação subterrânea e não apenas na identificação das feições geológicas das áreas em estudo, uma vez que se baseiam nas propriedades elétricas dos materiais, as quais são perturbadas quando existe a presença de contaminantes em subsuperfície (CETESB, *op. cit.*).

2.1.1 Método Eletromagnético Indutivo

Desde o seu início, a evolução da metodologia geofísica esteve vinculada à necessidade econômica de procura de minérios presentes em profundidade, sendo que não são recentes os estudos relativos ao emprego das propriedades físicas das rochas na prospecção de jazidas minerais, especificamente o magnetismo e a resistividade.

Entre os anos de 1919 e 1922, os suecos H. Lundberg e K. Sundberg iniciaram os trabalhos de exploração elétrica com campos variáveis, e, em particular, com métodos baseados na observação das linhas equipotenciais do campo elétrico e na intensidade do campo magnético, dando origem, assim ao desenvolvimento dos métodos eletromagnéticos indutivos (Aquino, 2000).

Segundo Parasnis (1970), os métodos eletromagnéticos mais utilizados atualmente foram desenvolvidos entre 1925 e 1940 na Suécia por Sundberg, em conjunto com H. Hedström, cujas pesquisas estavam voltadas para a prospecção de minerais metálicos e de petróleo. Estes estudos deram origem ao método de Sundberg ou do Compensador, que é utilizado para medições das componentes real e imaginária do campo eletromagnético, e ao método Turam, que é empregado nas medições da razão de amplitudes e da diferença de fase dos campos eletromagnéticos.

Adicionalmente, podem ser citadas as pesquisas dos norte-americanos Peters e Bardeen, durante a década de 30 para a determinação da profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas no solo como função da frequência emitida (Aquino, 2000).

Os métodos de emissor e receptor móveis, semelhantes as empregado nos levantamentos deste trabalho, foram desenvolvidos pelos suecos entre 1940 e 1950, sendo que, em particular, a utilização do método Slingram (do sueco slinga (bobina) e ram (aro)) tornou-se popular na América do Norte a partir de 1958 (Telford *et.al.*; 1990).

O desenvolvimento histórico das técnicas de prospecção eletromagnéticas centralizadas, a princípio, na Suécia e, posteriormente, no Canadá, segundo Stewart (1982), decorre das características geológicas apresentadas por estes dois países, que estão localizados numa vasta área de rochas cristalinas pré-cambrianas associadas a depósitos minerais, o que motivou as pesquisas relativas ao método.

A partir de 1984, com a vinda do professor John P. Greenhouse para o Brasil, esses métodos tiveram um grande impulso em nosso país na detecção da poluição subterrânea (Mendes, 1987).

2.1.2 Eletroresistividade e Polarização Induzida

Urish (1983) cita Swartz (1937) como um dos primeiros pesquisadores a realizar estudos de contaminação de águas subterrâneas, utilizando-se do método da eletroresistividade para delimitar a intrusão da cunha salina nas Ilhas Havaianas. A literatura (Kelly, 1976; Greenhouse, *et.al.*, 1983; Urish, 1983; Mendes, 1987), no entanto sempre menciona Cartwright & McComas (1968), devido à importância de seu trabalho no mapeamento de contaminantes (chorume) nos arredores de um aterro sanitário em Illinois – EUA. Greenhouse & Harris (1983) aplicaram métodos geofísicos no monitoramento da qualidade da água subterrânea próximo a um depósito de lixo. Greenhouse *et.al.* (1987) reúnem em uma publicação cinco casos de contaminação de águas subterrâneas estudados com os métodos geofísicos da eletroresistividade, eletromagnético indutivo e os métodos mais recentes, como o GPR, para mapeamento e monitoramento.

Ebraheem *et.al.* (1990), num levantamento para definir a resistividade elétrica de uma área contaminada, definiram uma relação empírica entre resistividade elétrica e sólidos totais dissolvidos.

O atual desafio de geofísica nos estudos sobre poluição em águas subterrâneas é detectar os contaminantes orgânicos, principalmente aqueles derivados de petróleo. Hidrocarbonetos dissolvidos provenientes do vazamento de tanques de combustível enterrados são relativamente

móveis nas zonas saturadas e não saturadas e, além disso, persistem nas águas subterrâneas durante décadas ou mais (Cherry, 1987; Cherry et.al. 1990; Kueper et.al. 1991).

Olhoeft (1985), utilizando-se do método da polarização induzida, detectou contrastes que podem ser originados em função de processos geoquímicos entre as argilas presentes e os contaminantes orgânicos. Vanhala et.al. (1992), num estudo experimental utilizando o método da polarização induzida, fez medidas em laboratório em amostras de tilito (2,5% de argila) contaminadas por tolueno, heptano e etileno glicol, e também em amostras não contaminadas, onde se observou que os elementos químicos orgânicos têm um efeito distinto nas medidas. No mesmo trabalho o pesquisador mostra através de modelos teóricos que o fenômeno medido em laboratório é detectável por investigações de campo. Borner et.al. (1993), também em laboratório, executaram experiências para detectar contaminantes orgânicos e inorgânicos utilizando polarização induzida a baixas frequências e demonstraram que as partes real e imaginária da condutividade elétrica complexa são influenciadas pela presença do contaminante.

Bernstone, *et. al.* (2000) realizaram ensaios geofísicos como uma técnica de pré-caracterização para escavações e remediação de áreas de disposição de resíduos. Os autores obtiveram bons resultados na identificação de caminhos preferenciais do conteúdo lixiviado e na posição da zona saturada, e detectaram anomalias discretas de alta e baixa resistividade, sugerindo possíveis locais de escavação.

Sodage, *et. al.* (2006) utilizaram os métodos da eletroresistividade e polarização induzida no mapeamento de uma pluma de contaminação gerada pelo vazamento de derivados de hidrocarbonetos, principalmente benzeno, ocorridos na década de 1970. Os dados de resistividade e IP estão de acordo com a distribuição da pluma detectada pelos poços.

2.2 Degradação no Meio Contaminado

A utilização de técnicas geofísicas, na avaliação de áreas contaminadas, muitas vezes é questionada quanto aos seus resultados, uma vez que na literatura são reportados dois modelos geoeletricos correlacionando as anomalias geoeletricas ao contaminante. O modelo de “camada isolante”, de Mazác *et. al.* (1980), considera a anomalia resistiva, e o “geoeletrico condutivo de pluma de *light nonaqueous-phase liquids* (LNAPLs)”, de Sauck (2000), considera a anomalia condutiva.

Devido à partição do hidrocarboneto em diferentes fases (livre, dissolvida e residual) em subsuperfície e do tempo para a transformação biológica dos hidrocarbonetos, são esperadas

variações das propriedades químicas e físicas dos sedimentos contaminados por hidrocarbonetos no tempo e no espaço do local contaminado (Atekwana *et.al.*, 2004).

A partir de experimentos em escala reduzida, Braga & Cardinalli (2005) demonstraram o aumento da resistividade elétrica em sedimentos arenosos após a adição de gasolina. Durante o intervalo de seis meses houve gradativa redução da resistividade que culminou com valores mais condutivos do que no meio não contaminado.

No trabalho de Lima *et. al.* (1995), a aplicação combinada da técnica de caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical descreve a detecção de plumas de contaminação provenientes de um aterro de resíduos líquidos derivados de petróleo, cuja correlação entre pseudo-seções de resistividade aparente e poços de monitoramento permitiu associar intervalos de baixa resistividade com áreas de concentração de contaminantes.

Em contrapartida, o uso combinado de métodos elétricos e eletromagnéticos por Benson, *et. al.*, (1997) no mapeamento de uma pluma de contaminação composta por benzeno, tolueno, xilenos e etil-benzeno (BTEX) e com elevada quantidade de sólidos totais dissolvidos resultou na detecção de uma anomalia de alta resistividade associada a elevadas concentrações de hidrocarbonetos sob a forma de fase livre pouco degradada, predominante em relação à quantidade de sólidos totais dissolvidos.

Esta aparente contradição pode refletir processos de degradação associados ao tempo de residência dos contaminantes, por meio da geração de subprodutos que alteram as propriedades físicas do meio, principalmente pela dissolução mineral por ação de ácidos orgânicos e pela neoformação de minerais de óxidos e hidróxidos de ferro.

Segundo o trabalho de Ehrlich (1996), a ação de microorganismos resulta na geração de ácidos orgânicos, que em quantidade elevadas passam a atacar os grãos minerais que constituem o meio. Este processo resulta na dissolução mineral e liberação de íons para a zona saturada do aquífero, com conseqüente alteração nos padrões de resistividade elétrica em relação ao meio não contaminado (McMahon & Chapelle, 1991).

Alguns trabalhos sugerem que a biodegradação de compostos pode mudar as propriedades geoquímicas do meio contaminado de forma acentuada, que podem chegar a alterações significativas em medidas de resistividade e na propagação de ondas eletromagnéticas (Sauck, 2000; Atekwana, *et. al.*, 2000). Estudos em escala de laboratório sugerem que a biodegradação de LNAPL sob condições aeróbicas e anaeróbicas podem mudar de forma substancial as condições biogeoquímicas do aquífero impactado, resultando em reduções drásticas de resistividade elétrica (Cassidy, *et. al.*, 2001).

Segundo Atekwanna, *et. al.* (2000), a resposta geofísica é bastante influenciada pelas diferentes fases dos hidrocarbonetos na subsuperfície, assim como pela evolução temporal e espacial da pluma de contaminação gerada. Portanto, a aplicação das técnicas geofísicas deve ser conduzida com um entendimento de como os processos que influenciam o comportamento do contaminante impactam a assinatura geofísica na área para os variados métodos geofísicos. Se as interpretações geofísicas puderem ser calibradas em relação a um modelo coerente baseado na combinação do entendimento geológico, geoquímico e biológico do sistema, então os resultados geofísicos serão muito mais valiosos.

Contaminantes derivados de hidrocarbonetos apresentam valores elevados de resistividade; entretanto, estes valores variam com o tempo, em função de reações com ácidos orgânicos ou ácidos carbônicos devido à biodegradação dos componentes do hidrocarboneto, tornando-os condutivos (Sauck, 2000).

2.2.1 Biodegradação de Hidrocarbonetos

Os compostos orgânicos são divididos em fase residual e fase dissolvida quando injetados no meio geológico (Rabus & Heider, 1998). A fase dissolvida apresenta alta mobilidade, pois migra quase concomitantemente ao fluxo da água subterrânea, enquanto que a fase residual representa o contaminante que impregna os grãos minerais.

Uma vez atingida a solubilidade máxima em água, a fase dissolvida tende a se dispersar e a reduzir seus teores. A partir desse momento, são criadas condições favoráveis para uma ação efetiva do processo de degradação por microorganismos, devido à redução da toxicidade e aumento no teor de oxigênio (Figura 2.1).

A atenuação natural consiste em um processo de remediação que inclui uma variedade de processos físicos, químicos e biológicos que, dentro de condições favoráveis, permite a redução de massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentrações de contaminantes no solo ou água subterrânea de forma natural, ou seja, sem intervenção humana. Esse processo ocorre naturalmente em qualquer área contaminada com variável grau de eficiência, dependendo dos tipos e concentrações de contaminantes presentes e dos processos físicos, químicos e biológicos característicos do solo e da água subterrânea (EPA, 2004).

Esse processo é importante para a degradação de derivados de petróleo, que podem ser degradados por organismos encontrados em quase todos os ambientes. Vários compostos de fase

líquida leve não aquosa (LNAPL), entre eles os BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) podem ser biodegradados sob condições ambientais (EPA, 1998).

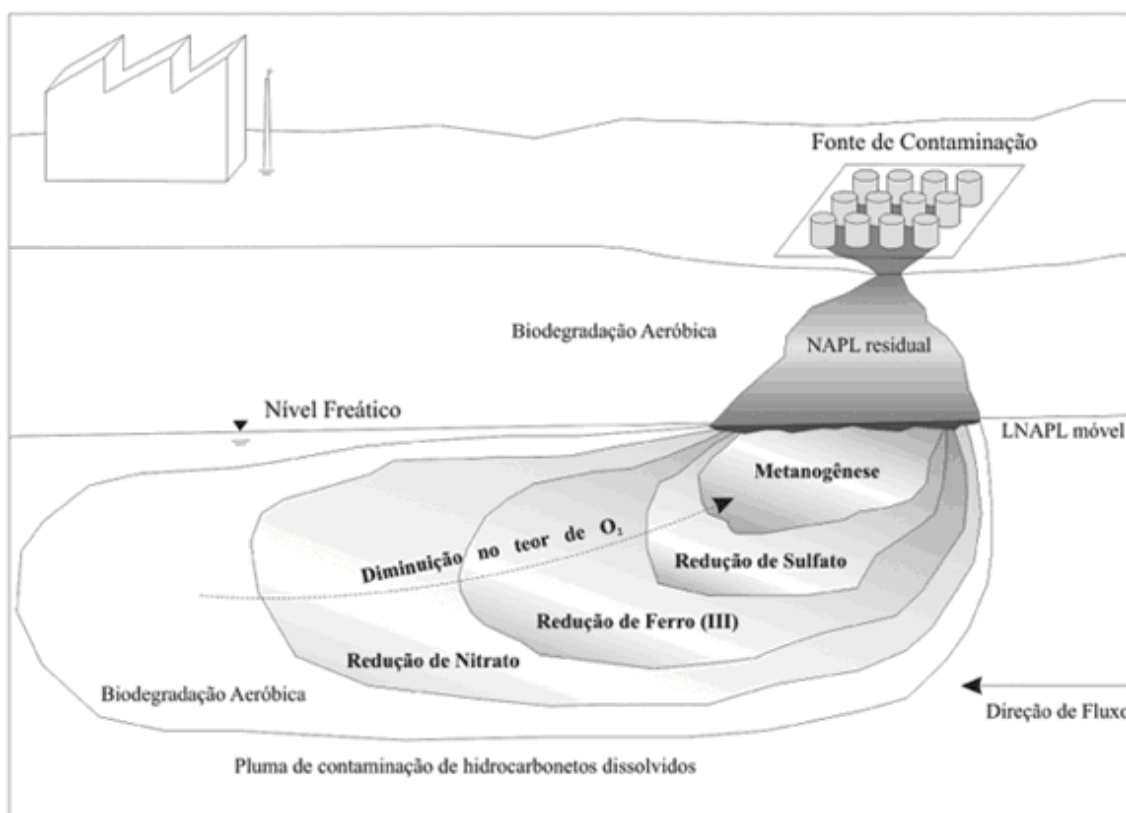


Figura 2.1 - Zonas de biodegradação de hidrocarbonetos (Adaptado de Rabus & Heider, 1998)

Essa degradação dos contaminantes por ação de microorganismos, denominada biodegradação, é um dos principais mecanismos responsáveis pela degradação de contaminantes com longos períodos de residência no ambiente (EPA, 1999). A eficiência desse processo depende de uma conjunção de fatores, como a presença de receptores elétricos como nitrato (NO_3^-), manganês (Mn^{4+}), ferro (Fe^{3+}), sulfato (SO_4^{2-}) e dióxido de carbono (CO_2), e condições adequadas de pH, Eh, temperatura e baixos teores de contaminação (EPA, 1998). Em muitos locais, o processo de biodegradação fica limitado às zonas periféricas da pluma contaminante, pois a presença de contaminante em elevadas concentrações torna o ambiente extremamente hostil a proliferação de microorganismos (Wilson & Jones, 1993; Rabus & Heider, 1998).

A degradação de derivados de petróleo por metabolismo microbiano produz uma variedade de subprodutos reativos, muitos dos quais interagem diretamente com solutos inorgânicos dissolvidos e minerais presentes. Estes subprodutos podem acelerar reações de dissolução e precipitação, complexação de íons metálicos em solução, alterações no estado de valência de íons metálicos e mobilização de metais solúveis (Harter, 1977).

CAPÍTULO 3

3 Área de Estudo

A área de estudos está localizada na zona sul do município de São Paulo - SP, no bairro de Parelheiros.

O perímetro da indústria química alvo das investigações é limitado a oeste pela estrada de Jaceguava, a qual margeia a represa de Guarapiranga (Figura 3.1).

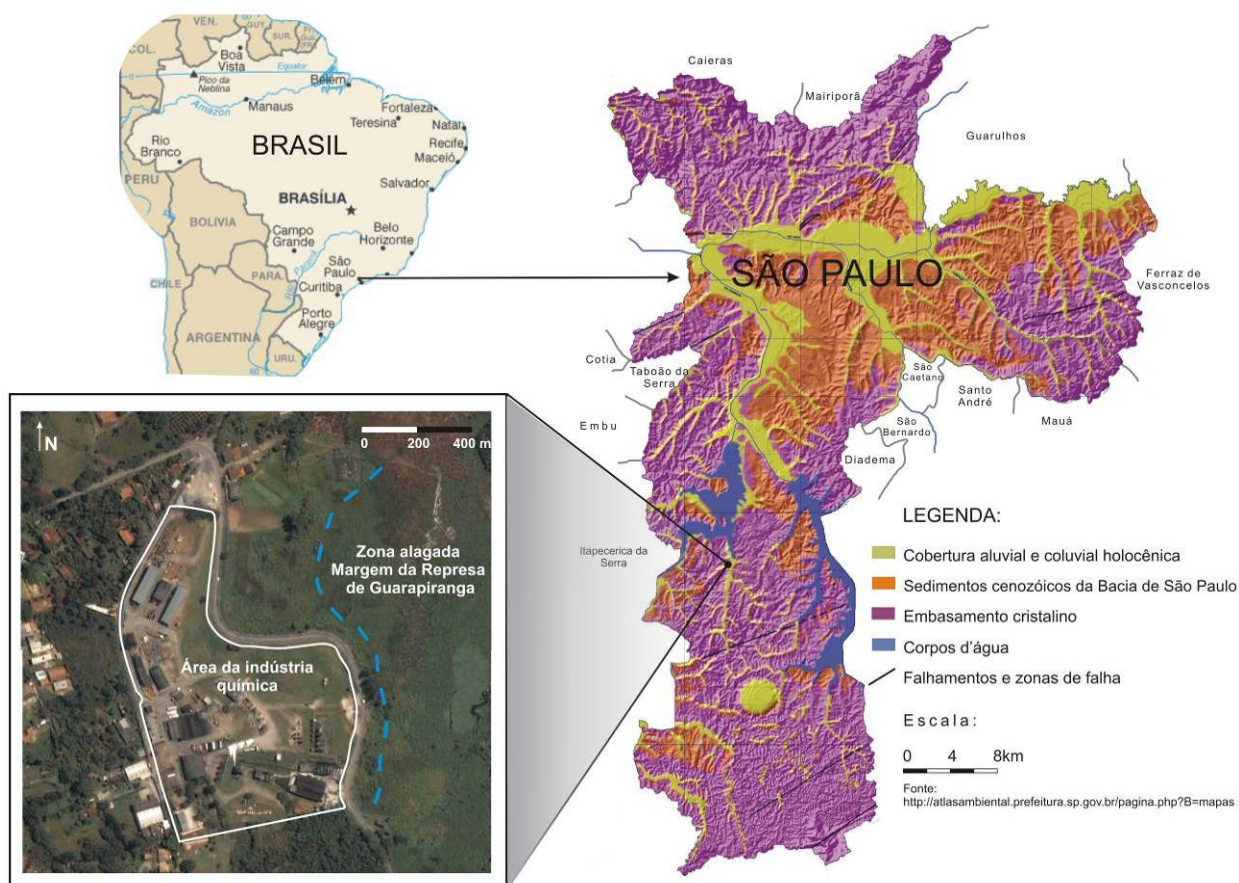


Figura 3.1 - Perímetro da indústria química alvo dos estudos (branco). A mesma se localiza na zona sul do município de São Paulo – SP, no bairro de Parelheiros, e está delimitada a oeste pela estrada de Jaceguava, a qual margeia a represa de Guarapiranga (tracejado azul).

Na área de estudos uma indústria química desenvolve atividades relacionadas à fabricação de tintas, empregando no processo de produção solventes diversos, contendo hidrocarbonetos derivados de petróleo e organoclorados.

Na área objeto desta pesquisa, já foram realizados estudos e avaliações por Salles (1999 e 2005), onde os resultados das análises químicas de água subterrânea confirmaram a presença de contaminação por diversos compostos químicos, dentre eles, Organoclorados (Clorofórmio; 1,2 Dicloroetano; 1,1,1 Tricloroetano; Tricloroetileno; Tetracloroetileno), Benzeno, Tolueno e Xilenos. Tal contaminação se caracteriza pela quantidade de compostos químicos dissolvidos na água subterrânea acima dos limites de risco à saúde humana estabelecidos no manual de valores orientadores da CETESB (CETESB, 2005). A Tabela 3.1 apresenta os resultados das análises químicas de alguns poços de monitoramento cuja água subterrânea está contaminada (Salles, 2005). Os posicionamentos destes poços de monitoramento dentro da área de estudo podem ser visualizados a seguir na Figura 3.4.

Há cerca de 30 anos esta indústria foi afetada por um acidente, quando, por motivos não esclarecidos, um incêndio ocorrido na fábrica de tintas ocasionou uma explosão que possibilitou a infiltração de quantidade não estimada de solventes no solo não impermeabilizado (Salles, 1999).

Na época, além do acidente, práticas de armazenamentos de tambores contendo resíduos de solventes em áreas não impermeabilizadas e expostas á intempéries, constituíam possíveis fontes de contaminação de solo e/ou água subterrânea.

Como terceira fonte de contaminação, foram notificados derramamentos acidentais de produto numa área onde são efetuados trabalhos de recuperação de solventes. O manuseio do produto ocasionou perdas acidentais de pequenos volumes que migraram pelas canaletas de contenção existentes nas proximidades para o exterior da indústria, atingindo eventualmente a zona que margeia a represa de Guarapiranga (Figura 3.1).

Para agravar ainda mais o problema, a indústria fica situada próxima a moradias, o que pode comprometer a qualidade da água utilizada pelas famílias, através de poços cacimbas. A indústria também se situa às margens da represa de Guarapiranga que também fornece água para o abastecimento da cidade de São Paulo.

Área de Estudo

Tabela 3.1 - Resultado das análises químicas de água subterrânea de alguns poços de monitoramento (modificado de Salles, 2005).

Composto Químicos	PM-01 (µg/L)	PM-02 (µg/L)	PM-05 (µg/L)	PM-07 (µg/L)	PM-08 (µg/L)	PM-12 (µg/L)	PM-13 (µg/L)	PM-15 (µg/L)	PM-20 (µg/L)	PM-31 (µg/L)	Valores de Intervenção da CETESB (µg/L)
Benzeno	80,00	240,00	ND	126,50	318,60	200,00	6,80	11,10	31,40	322,50	5,00
Tolueno	452,50	706,00	ND	1.350,00	8.232,90	7.242,00	2,30	ND	ND	4.650,00	700,00
Xilenos	525,00	3.475,00	ND	824,70	5.079,60	1.650,00	ND	ND	ND	700,00	500,00
Clorofórmio	13,50	6,70	267,90	429,50	ND	ND	ND	5,30	ND	281,64	200,00
1,2-Dicloro Etano	241,80	98,40	564,70	1.563,40	34,00	13,25	16,50	23,70	690,30	3.415,19	10,00
1,1,1-Tricloroetano	1,60	ND	7,50	257,90	ND	ND	ND	ND	ND	22,91	280,00
Tetracloroeto de Carbono	ND	ND	38,10	ND	ND	ND	ND	ND	ND	82,75	2,00
Tricloroetileno	11,10	6,80	372,30	750,30	3,30	ND	ND	15,00	23,20	140,00	70,00
Tetracloroetileno	2,80	9,10	176,70	395,30	ND	ND	ND	6,00	5,00	34,79	40,00

ND: não detectado; valores acima dos limites de intervenção da CETESB (vermelho)

3.1 Caracterização Geológica Regional

A cidade de São Paulo está inserida numa extensa área do Escudo Atlântico do Estado de São Paulo, cujos principais domínios tectônicos são: as Coberturas Cenozóicas, que incluem a Bacia de São Paulo e a Bacia de Taubaté; e as Faixas Brasilianas de Dobramentos do embasamento cristalino, divididas em: Faixa de Dobramentos Apiaí, a norte, e Faixa de Dobramentos São Roque, a sul.

A região está estruturada segundo orientação NE-SW. Os limites dos principais falhamentos da região, a Falha de Cubatão, a sul, e a Falha de Taxaquara, englobam a Faixa de Dobramentos Apiaí e divide a Faixa de Dobramento São Roque, a norte. A Bacia de São Paulo recobre a Falha de Taxaquara, e diversas outras falhas de mesma orientação, e também divide as duas Faixas de Dobramentos citadas. Juntamente com a Bacia de Taubaté, ambas constituem o Graben do Paraíba, que também possui orientação NE-SW.

A geologia da cidade de São Paulo está dividida de acordo com o zoneamento da cidade. De acordo com o estudo desenvolvido neste projeto, serão descritas de forma resumida as unidades estratigráficas, baseadas no mapa geológico do estado de São Paulo, IPT (1981).

A Bacia de São Paulo (Cenozóico) está quase toda inserida na zona central da cidade, bem como as margens dos dois rios mais importantes da cidade, Rios Tietê e Pinheiros e também as margens das represas Billings e Guarapiranga, ambas na zona sul e sudeste da cidade. A Bacia de Taubaté (Cenozóico) só aflora no extremo da zona leste. O Grupo São Roque (Neoproterozóico) tem suas rochas restritas às zonas norte e noroeste. Já o Grupo Açungui (Neoproterozóico) aflora em toda a região, com exceção à zona noroeste. São afloramentos localizados principalmente nas zonas sul e leste da cidade. O Complexo Costeiro (Arqueano) aflora somente no extremo da zona sul da cidade. Por fim, temos as Suítes Graníticas Sin e Pós-tectônicas (Neoproterozóico - Cambriano), unidades intrusivas nas rochas proterozóicas que afloram por todas as partes da cidade.

O Complexo Costeiro está distribuído na zona costeira do Estado e é composto predominantemente por rochas migmatíticas, tais como metatexitos de estrutura variada (predominando a estromatítica) e diatexitos com termos oftalmíticos, facoidais e homofânicos portando paleossoma de natureza diversa (xistoso, anfíbolítico, gnáissico, quartzítico, calossilicáticos).

O Grupo Açungui constitui a mais extensa unidade da região e ocupa quase toda área da Faixa de Dobramentos Apiaí. Este é dividido em duas unidades: Complexo Embu, composto por

migmatitos heterogêneos de estruturas variadas, predominando estromatitos de paleossoma xistos, gnáissico ou anfibolítico; e o Complexo Pilar, composto essencialmente por conjunto de xistos (quartzo-mica xistos, biotita-quartzo xistos, granada-biotita xistos, xistos grafitosos, clorita xistos, sericita-biotita xistos, talco xistos, etc).

O Grupo São Roque é representado por metassedimentos compostos por: uma seqüência de metapelitos (conjunto de filitos, quartzo filitos e filitos grafitosos, em sucessão rítmica); um conjunto de xistos a biotita e/ou muscovita, clorita xistos e quartzo xistos com intercalações de metassiltitos, filitos, metagrauvas, calcários dolomíticos e rochas calcossilicatadas; uma seqüência metapsamítica formada por quartzitos feldspáticos com metaarcósios e metagrauvas subordinadas; e rochas carbonáticas na forma de calcários dolomíticos e calcíticos.

As Suítes Graníticas Sin-tectônicas são representadas pelas rochas da Fácies Cantareira, que é composta por corpos graníticos para-autóctones e alóctones, foliados, de granulação fina a média, de composição granodiorítica a granítica, enquanto que as Suítes Graníticas Pós-tectônicas são representadas pelas rochas da Fácies Itu, a qual é composta por corpos graníticos alóctones, isótopos, de granulação fina a grossa, com textura sub-hipidiomórfica e hipidiomórfica granular.

As Bacias Cenozóicas estão representadas pela Formação Caçapava do Grupo Taubaté, composta por sedimentos arenosos e siltosos, com intercalações pelíticas, de cores cinza, amarela e vermelha, dispostas em camadas planoparalelas ou lenticulares, em que se notam estruturas hidrodinâmicas, caracterizando ambiente fluvial, e pela Formação São Paulo, composta por sedimentos fluviais, incluindo argilitos, siltitos, arenitos argilosos finos e, subordinadamente, arenitos grossos, cascalhos, conglomerados e restritos leitões de argilas orgânicas, além de sedimentos quaternários continentais aluvio-fluvionares de natureza areno-argilosa (IPT, *op. cit.*).

Coberturas aluvionares completam a geologia da região, compostas essencialmente por sedimentos inconsolidados, tais como areias de granulação variada, argilas e cascalheiras fluviais, os quais se associam aos entornos dos rios (IPT, *op. cit.*).

Segundo Salles (1999), a área de estudo está inserida no Grupo Açungui, Complexo Pilar, o qual é caracterizado pela predominância de quartzo-mica xistos, biotita-quartzo xistos, muscovita-quartzo xistos, granada-biotita xistos, xistos grafitosos, clorita xistos, sericita-biotita xistos, talco xistos, magnetita xistos e calcoxistos com intercalações subordinadas de filitos, quartzitos, calcossilicáticas e metassiltitos. O autor ainda citou que estruturas metamórficas são ainda preservadas no solo de alteração, tendo sido identificadas foliações com direção predominante NE-SW e mergulho preferencial médio de 70° rumo á NW.

A geologia regional da área pode ser visualizada na Figura 3.2.

3.2 Potenciometria

A potenciometria foi determinada através das medidas feitas nos poços de monitoramento existentes na área de estudo.

Para obtenção de resultados precisos, os poços de monitoramento foram esgotados e permaneceram em recuperação pelo período mínimo de 72 h, sendo então efetuadas as medidas de campo. As medidas foram efetuadas por medidor de N.A. eletrônico e trena e os dados foram tabelados para posterior interpretação (Salles, 2005).

As medidas dos níveis d'água no interior dos poços de monitoramento foram relacionadas às suas cotas, de forma a serem determinados os valores de potenciometria em cada poço. Em seguida, a interpolação dos valores potenciométricos de cada poço permitiu a determinação da superfície potenciométrica e a definição do sentido preferencial de fluxo da água subterrânea, como pode ser observado na Figura 3.3. Para uma melhor visualização do sentido de fluxo das águas subterrâneas foi elaborado um mapa potenciométrico tridimensional da área que engloba os poços de monitoramento (Figura 3.4). Deve-se atentar ao fato de que os mapas não estão localizados conforme suas coordenadas UTM's, mas sim, por distâncias reais arbitrárias.

Nos mapas potenciométricos apresentados percebe-se o condicionando do sentido do fluxo da água subterrânea para leste-nordeste, no sentido da represa de Guarapiranga.

Área de Estudo

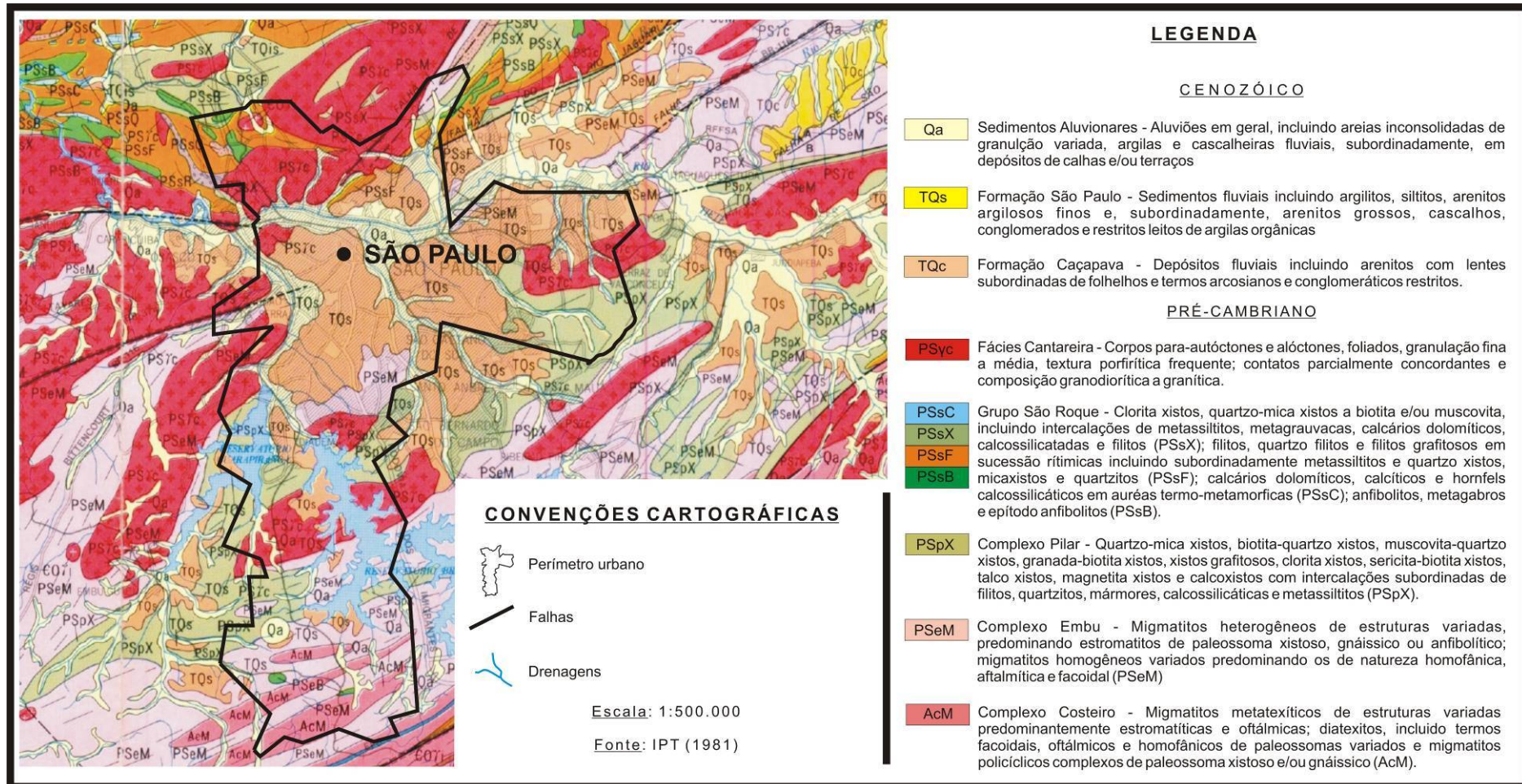
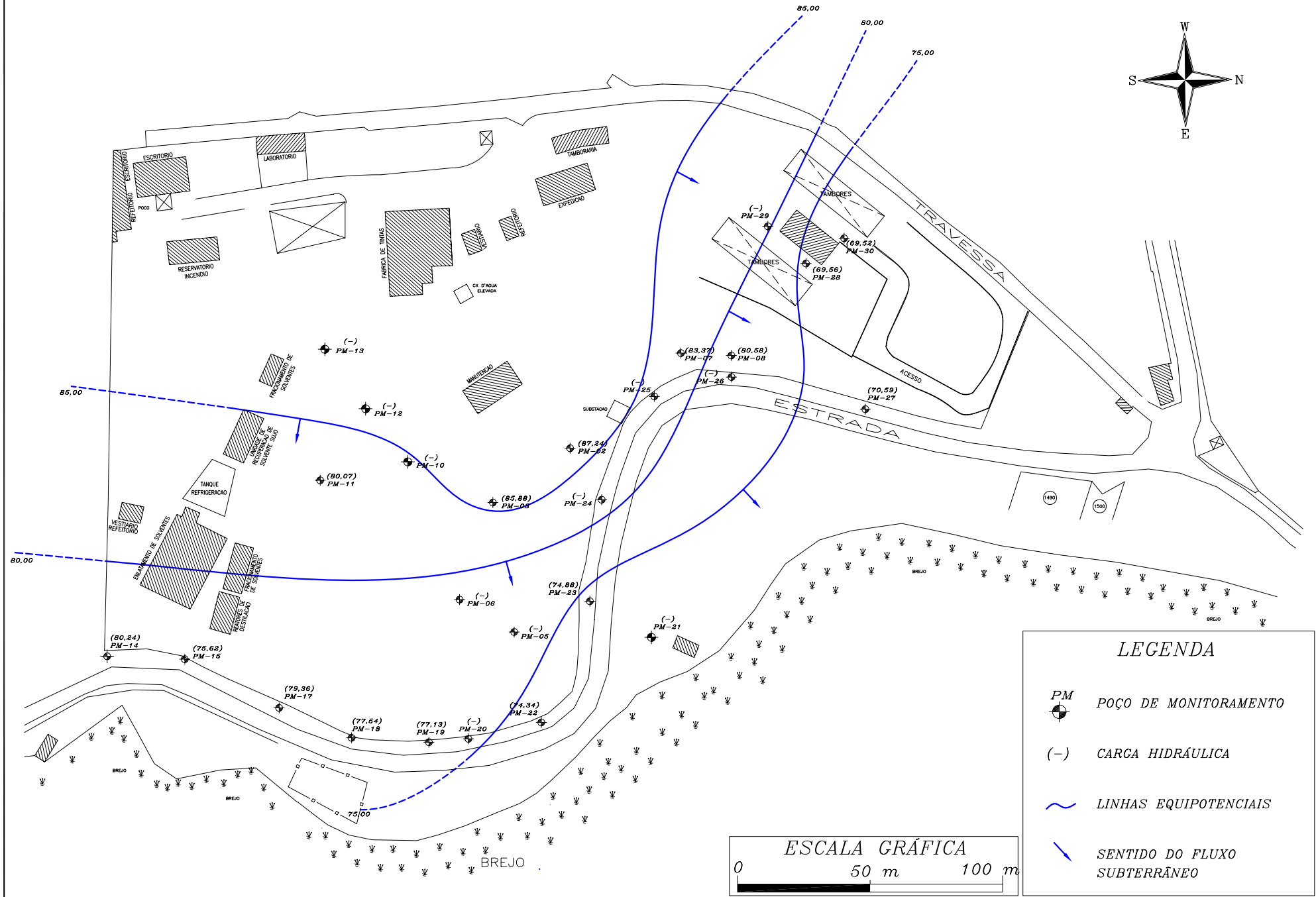


Figura 3.2 - Geologia regional da cidade de São Paulo (modificado de IPT, 1981).

FIG. 3.3 – MAPA POTENCIOMÉTRICO DA ÁREA DE ESTUDO



LEGENDA

- PM POÇO DE MONITORAMENTO
- (-) CARGA HIDRÁULICA
- ~ LINHAS EQUIPOTENCIAIS
- SENTIDO DO FLUXO SUBTERRANEO

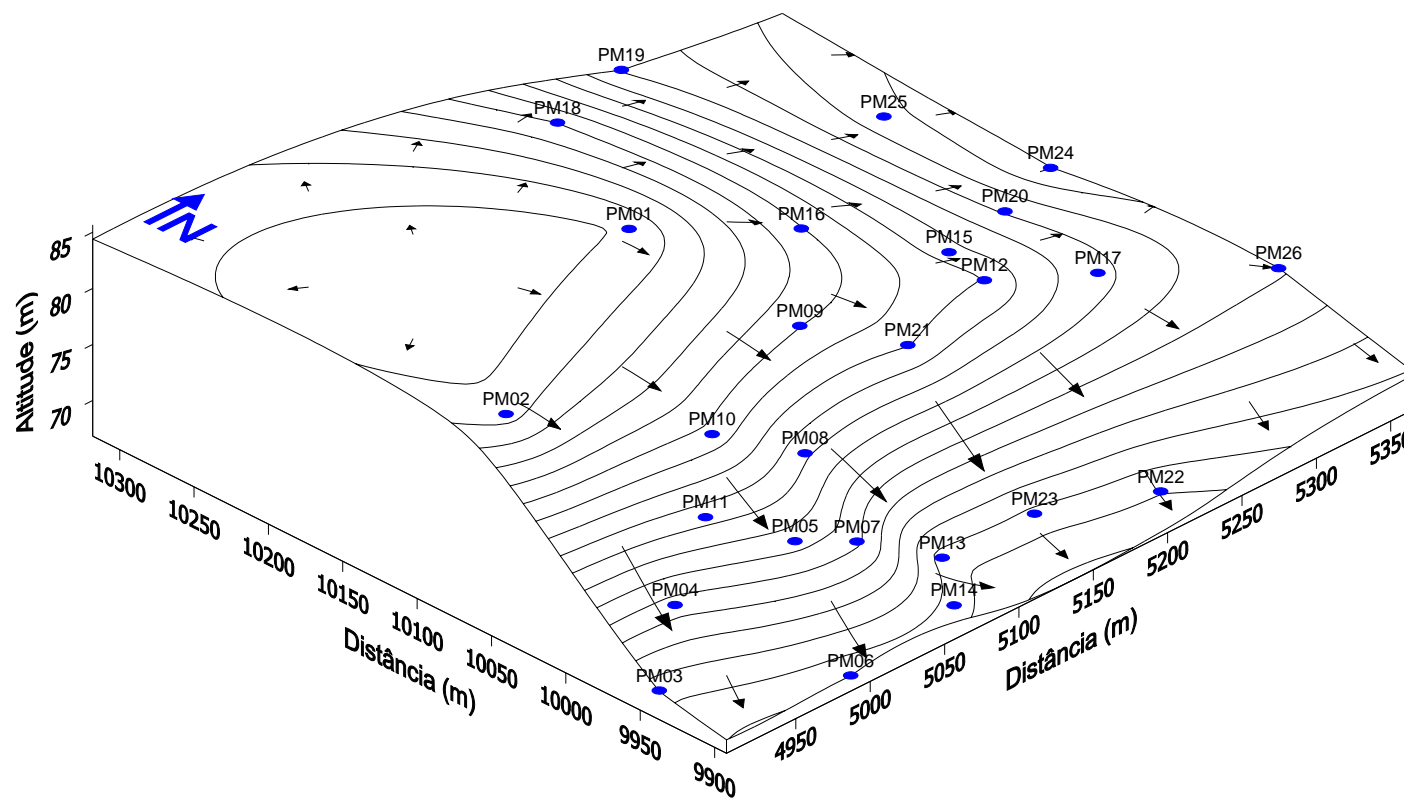


Figura 3.4 – Mapa potenciométrico tridimensional da área que engloba os poços de monitoramento.

CAPÍTULO 4

4 Metodologia

4.1 Método da Eletroresistividade

A resistividade elétrica e seu inverso (a condutividade elétrica) relacionam-se aos mecanismos de propagação de correntes elétricas nos materiais pela condução eletrônica e eletrolítica. A condutividade eletrônica em solos e rochas pode ocorrer devido à presença de minerais metálicos e grafita (condutores) em sua matriz, e a condutividade eletrolítica devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas.

Em geral, a condutividade é eletrolítica, pois apenas em casos específicos os minerais condutores ocorrem em rochas em quantidades suficientes para aumentar sua condutividade global. A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrolítica é afetada principalmente por quatro fatores:

- composição mineralógica;
- porosidade;
- teor em água;
- quantidade e natureza dos sais dissolvidos.

Dentre esses fatores, os mais importantes são o teor de umidade e a salinidade. O aumento do valor desses fatores, teor de umidade e quantidade de sais dissolvidos, leva a uma diminuição dos valores de resistividade. Devido a essa série de fatores, o parâmetro resistividade tem um amplo limite de variação, mesmo para um único tipo de rocha.

Estas condições é que possibilitam a aplicação da eletroresistividade em estudos ambientais e hidrogeológicos, onde a presença de água nos poros e, eventualmente, contaminantes ricos em sais podem ser investigados pelo método (Elis *et.al.*, 2004).

Um bom método para caracterizar uma zona contaminada é através da resistividade elétrica do solo. Hidrocarbonetos em geral têm resistividades muito maiores que da água, assim sendo, a pluma de contaminação pode ser detectada por anomalias de alta resistividade (Vega *et.al.*, 2003).

4.1.1 Fundamentos Teóricos

A aplicação da Eletroresistividade como meio de prospecção geofísica baseia-se na resposta dos materiais terrestres ao fluxo de corrente elétrica alternada a baixas frequências (tipicamente 0,03Hz a 3Hz), de acordo com Ward, 1990.

O método emprega uma corrente artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos, com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície.

De acordo com Ward (*op.cit.*), para um eletrodo utilizado como fonte na origem de um sistema de coordenadas (Figura 4.1), em qualquer superfície esférica S , à distância r da origem, a corrente flui radialmente.

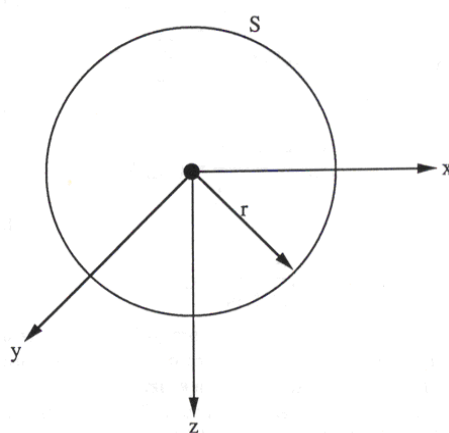


Figura 4.1 - Um eletrodo na origem O de um sistema de coordenadas. S é a superfície de uma esfera de raio r (Ward, 1990).

Como a área da superfície S é $4\pi r^2$, a densidade de corrente à distância r é dada por:

$$J_r = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde I é a intensidade de corrente.

Sendo $\rho = \frac{1}{\sigma}$ a resistividade isotrópica e homogênea, a *Lei de Ohm* pode ser escrita na

forma:

$$E_r = J_r \rho = \frac{I\rho}{4\pi r^2} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

E_r é o campo elétrico gerado por I .

O potencial (ou voltagem) V a distância r do eletrodo é dada pela integral de E_r entre r e o infinito:

$$V \int_r^\infty E_r d_r = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Como os eletrodos estão dispostos na superfície do terreno e considera-se a resistividade do ar como infinita, o fluxo de corrente se dará no meio geológico, que é comumente denominado de semi-espço. Um eletrodo C na superfície do semi-espço dá origem a um fluxo de corrente radial através de um hemisfério de raio r e área da superfície de $2\pi r^2$ (Figura 4.2).

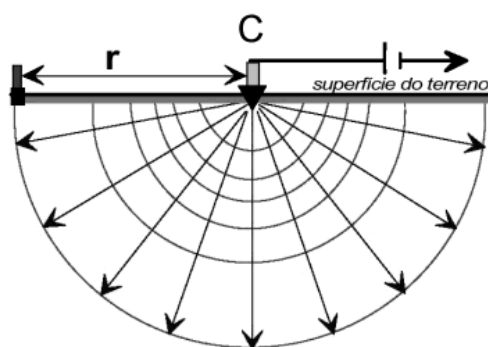


Figura 4.2 - Eletrodo C em um ponto do semi-espço e o fluxo radial de corrente.

Dessa forma, a densidade de corrente para um eletrodo em um semi-espço homogêneo é

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

E o potencial é

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Esta equação fornece as relações fundamentais para a prospecção elétrica realizada na superfície terrestre. No entanto, são necessários dois eletrodos para a transmissão de corrente ao semi-espço, de forma que a corrente adentre à subsuperfície por um eletrodo e saia por outro, como é ilustrado na Figura 4.3.

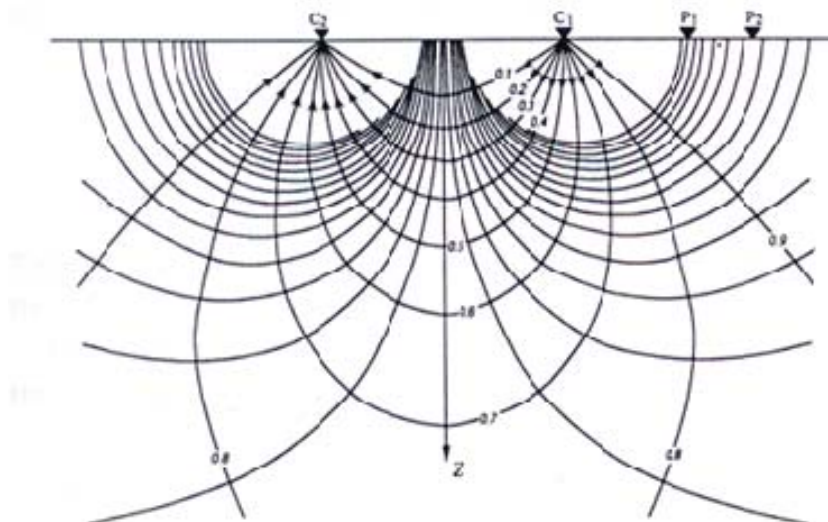


Figura 4.3 - Distribuição das linhas corrente e potencial para dois eletrodos de corrente na superfície de um semi-espço homogêneo.

O potencial lido em P_1 devido ao fluxo de corrente gerado por C_1 e C_2 é:

$$V_p = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Onde o sinal negativo no segundo termo da equação denota a mudança do sinal de corrente nos eletrodos C_1 e C_2 e onde r_1 é a distância entre P_1 e C_1 e r_2 é a distância entre P_1 e C_2 .

Na prática, o que se mede é uma diferença de potencial entre dois eletrodos de potencial, de forma que o arranjo é composto de quatro eletrodos. Para esse arranjo a diferença de potencial pode ser escrita como:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Onde r_3 é a distância entre P_2 e C_1 e r_4 é a distância entre P_2 e C_2 .

Para esse dispositivo de quatro eletrodos é convencional denominar os eletrodos de corrente de A e B e os eletrodos de potencial de M e N, sendo as distâncias utilizadas nos ensaios de campo identificadas por essas convenções (Figura 4.4). Dessa forma, pode-se escrever $AM = r_1$, $BM = r_2$, $AN = r_3$ e $BN = r_4$. A equação anterior pode ser escrita usando-se estas convenções:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

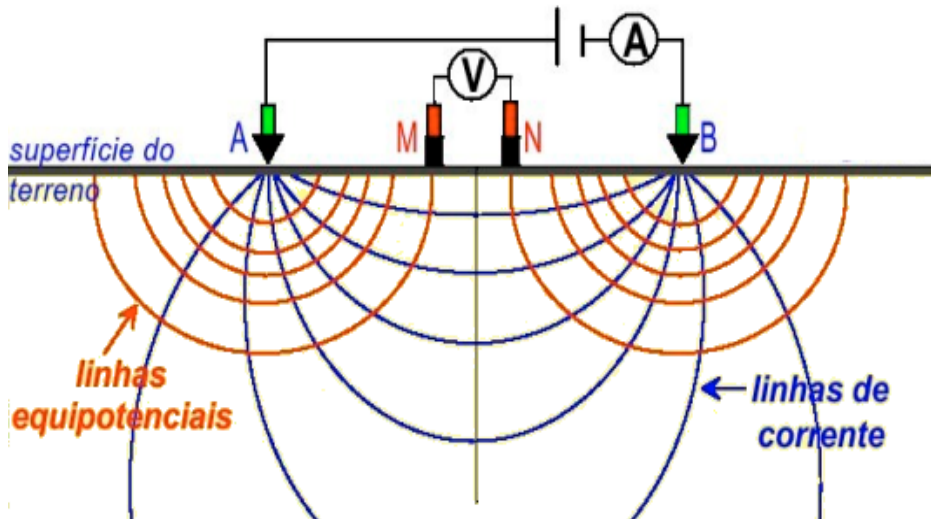


Figura 4.4 - Esquema de campo para determinação da resistividade.

Trabalhando com a Equação 4.8 podemos isolar o termo ρ para calcular seu valor. Na prática, o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo e o valor calculado reflete uma média ponderada de todas as resistividades reais dos corpos e camadas investigados, de forma que o valor obtido é a resistividade aparente ρ_a para aquela posição dos eletrodos. O cálculo de ρ_a do meio investigado é então dado por:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \text{ ohm.m} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

ρ_a = resistividade elétrica aparente (ohm.m)

K = fator geométrico

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N

I = intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B

sendo K o fator geométrico que depende das posições dos eletrodos dado pela fórmula geral:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

O uso do método da Eletroresistividade no campo é baseado na capacidade de um equipamento introduzir uma corrente elétrica no subsolo a partir de diferentes espaçamentos entre os eletrodos dispostos na superfície do terreno (diferentes profundidades de investigação) e calcular as resistividades dos materiais geológicos a estas várias profundidades investigadas.

Dentro do método da eletroresistividade existem várias técnicas de aplicação dos ensaios em campo. São divididas basicamente em técnicas de sondagem elétrica (SEV) e caminhamento elétrico (CE), dentro das quais existe uma grande variedade de configurações possíveis de

eletrodos, o que confere ao método grande versatilidade. Normalmente, os ensaios de sondagem elétrica são aplicados quando é desejada uma informação pontual com observação da variação vertical do parâmetro físico e o caminhamento é aplicado quando o interesse é pelo estudo da variação lateral da resistividade em profundidade teoricamente constante.

A determinação da resistividade nas rochas pode ser feita em laboratório, em ensaios em amostras de rocha ou de testemunhos de sondagem, e “in situ”, ao longo de furos de sondagem ou através de técnicas de medidas realizadas na superfície. Nesse último caso, deve-se atentar para o fato de que, para uma sucessão de camadas com diferentes valores de resistividade, a resistividade determinada pelo quadripolo AMNB na superfície será aparente a medida que os eletrodos de corrente, em razão de um maior espaçamento, amostram mais de uma camada em subsuperfície. O valor encontrado será, então, influenciado pelas resistividades de todas as camadas investigadas.

Assim, como o subsolo não se comporta como um meio homogêneo, a resistividade aparente (ρ_a) é a medida que expressa os resultados no método da eletroresistividade, e a qual se toma como base para a interpretação. As variações nas medidas de resistividade aparente são interpretadas, então, como desvios em relação a um meio totalmente uniforme, em função da estratificação geoeletrica do meio investigado (Gallas, 2000).

4.2 Método da Polarização Induzida (IP)

A polarização induzida é um fenômeno elétrico estimulado por corrente elétrica observado como resposta retardada à voltagem, em materiais naturais (Sumner, 1976). Este método baseia-se na medição das variações de voltagem em função do tempo. Em alguns corpos que são atravessados por uma corrente elétrica, quando esta é interrompida, a diferença de potencial gerada não desaparece bruscamente, mas é atenuada gradualmente. Durante o tempo de fluxo original injetado, presume-se que alguma energia seja armazenada no material. O decaimento da voltagem no material, medido após esse fluxo, representa a volta do material para o seu estado natural após o distúrbio gerado pela corrente aplicada.

A medida do parâmetro de IP pode ser realizada no domínio do tempo, chamado de IP – Domínio do Tempo, e no domínio da frequência, IP – Domínio da Frequência. Neste trabalho, será dada mais relevância ao modo IP – Domínio do tempo.

Para entender de forma mais clara esse fenômeno voltamos à Figura 4.5. Ela mostra que ao se aplicar uma corrente elétrica no solo, cria-se uma diferença de potencial ΔV primária; conseqüentemente, é provocada uma polarização desse solo. A diferença de potencial primária

(ΔV_p) é atenuada gradualmente com uma constante de tempo de várias dezenas de segundos na forma de uma curva $\Delta V_{IP} = f(t)$, também chamada de Curva de Descarga IP (Orellana, 1972). Esta curva liga a assíntota ΔV_p em regime estacionário com a assíntota zero após o corte da corrente. A amplitude de um valor $\Delta V_{IP}(t)$ está diretamente ligada à maior ou menor capacidade que os terrenos têm de se polarizarem, constituindo-se no efeito IP dos materiais da terra.

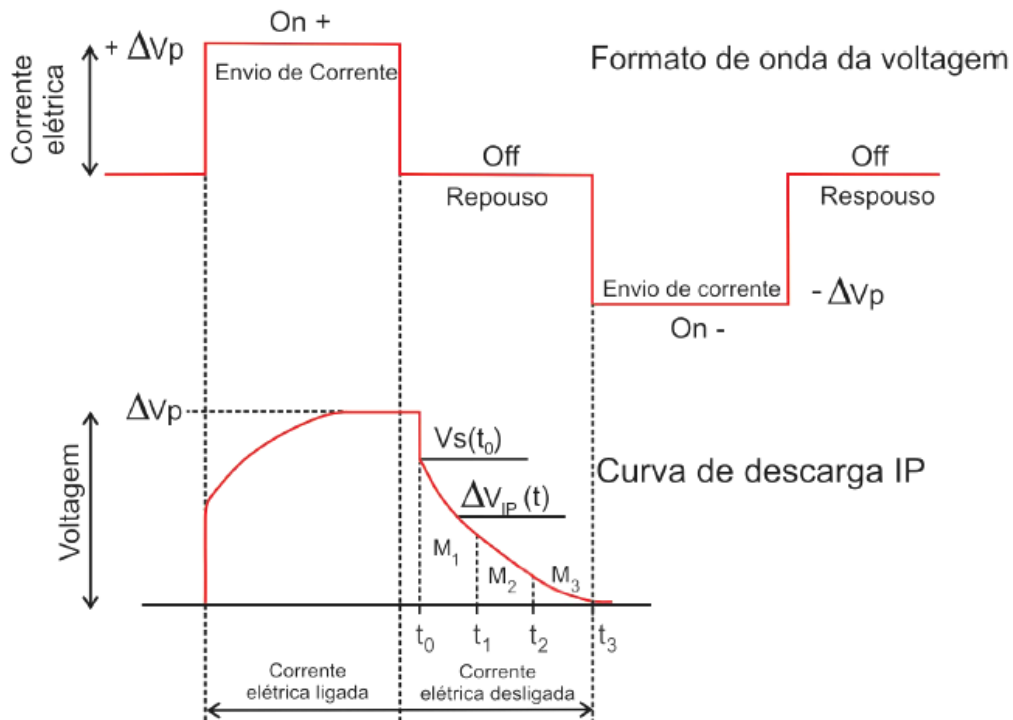


Figura 4.5 - Formato da onda de corrente elétrica e a representação do efeito IP. Variação de ΔV em função do tempo, ilustrando o momento de interrupção da passagem de corrente elétrica e o retardamento da perda de voltagem (Modificado de Sumner, 1976; Braga, 1997 e Fachin 2007).

Analogamente, pode-se descrever o fenômeno da polarização induzida como se o solo contivesse pequenos condensadores que são carregados durante a emissão de corrente e descarregados após o corte (Gallas, 2000).

A forma de se medir o efeito da polarização induzida no domínio do tempo é comparando os valores de diferença de potencial elétrico residual existente num determinado espaço de tempo t após a interrupção de corrente elétrica ao potencial primário.

Os valores medidos da $\Delta V_{IP}(t)$ são muito menores que os valores da ΔV_p , e a relação entre ambos pode ser expressa pelo parâmetro denominado cargabilidade (M), que é a forma mais utilizada para se expressar a resposta IP dos materiais naturais (Telford et.al. 1990).

Parasnis (1986) definiu o termo cargabilidade como a área sob a curva do potencial transiente entre um intervalo de tempo definido, t_1 e t_2 . A cargabilidade é definida pela integração da curva de descarga durante um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$ e é fornecida por:

$$M = \frac{1}{\Delta V_p} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IP}(t) dt \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Quando $\Delta V_{IP}(t)$ e ΔV_p têm as mesmas unidades, a cargabilidade (M) pode ser medida em milissegundos, mas geralmente é expressa em mV/V (milivolt por Volt) (Sumner, 1976). Para se ter resultados consideráveis fora do nível de ruído ou evitar a perda da sensibilidade da detecção do equipamento, a $\Delta V_{IP}(t)$ deve ser medida num intervalo de tempo t entre 0.1 e 10 segundos.

Provavelmente a energia armazenada no material durante o tempo de fluxo original injetado existe sob diversas formas como, por exemplo, mecânica, elétrica e química. Entretanto, diversos estudos de polarização estabeleceram que a energia química é a mais importante (Telford *et.al.*, 1990).

Braga (1999) reúne diversos trabalhos sobre polarização induzida em hidrogeologia e conclui que:

- A magnitude do efeito da polarização induzida depende da resistividade da solução, da quantidade e espécie de argila e do cátion que satura a argila;
- Geralmente, a polarização diminui com a diminuição da resistividade, então camadas de argilas e águas salgadas resultam em pequenos efeitos IP;
- Areia quartzosa pura, saturada com água, não mostra quase nenhum efeito IP;
- Argilas puras apresentam baixa resistividade e muito baixa polarização;
- Camadas arenosas apresentam alta resistividade e cargabilidade intermediária;
- A resposta IP em camadas com misturas de areias e argilas é bem maior do que a resposta em camadas argilosas puras.

4.2.1 Fontes dos Efeitos de Polarização Induzida

O armazenamento de energia química é o resultado de:

- Variações na mobilidade dos íons no fluido através da estrutura da rocha – polarização de membrana. Constitui o *background* do efeito IP e ocorre em rochas que não contêm minerais metálicos;
- Variações entre a condutividade eletrolítica e eletrônica quando minerais metálicos estão presentes – polarização de eletrodo. Tem magnitude maior do que o *background* e depende da presença de minerais metálicos na rocha.

Os dois efeitos são indistinguíveis para a medição do efeito IP.

4.2.1.1 Polarização de Eletrodo

O efeito de polarização de eletrodo ocorre quando estão presentes minerais metálicos na rocha, como os sulfetos (pirita, pirrotita, calcopirita, galena) e grafita, os quais apresentam alta condutividade eletrônica nos materiais geológicos, ou seja, na matriz da rocha. O comportamento do fluxo de corrente elétrica neste tipo de efeito é parte eletrônico, parte eletrolítico. Esse comportamento pode ser explicado devido a reações químicas que ocorrem na interface desses minerais metálicos quando submetidos a uma determinada corrente elétrica. Na presença de um mineral metálico, uma rede de cargas superficiais de sinais opostos é formada em cada face, resultando em uma acumulação de íons no eletrólito adjacente a cada face, como mostra a Figura 4.6. A ação é de eletrólise quando a corrente flui: ocorre uma troca de elétrons entre o metal e a solução iônica na interface. Na físico-química, esse efeito é conhecido como sobrevoltagem (*overvoltage*).

Devido à velocidade do fluxo de corrente no eletrólito ser muito menor que no metal, o acúmulo de íons é mantido pela voltagem externa. Quando a corrente é interrompida, a voltagem residual decai conforme os íons voltam ao seu estágio de equilíbrio original.

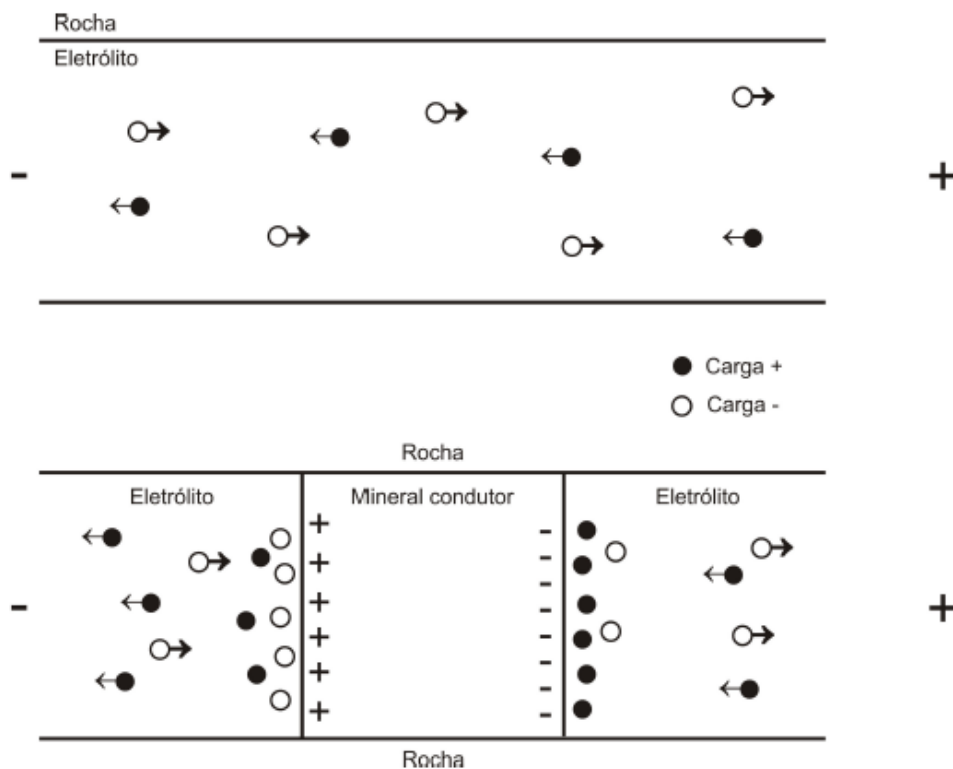


Figura 4.6 - Fluxo eletrolítico no poro superior e polarização de eletrodo no poro inferior. (modificado de Telford et. al., 1990).

Segundo Telford et.al., (1990) a magnitude da polarização de eletrodo depende da fonte de corrente externa e de um número de características do meio geológico. Ela varia diretamente com a concentração mineral, mas devido ao fato de ser um fenômeno de superfície, deve ser maior quando um mineral ocorre de forma disseminada do que quando é maciço. O tamanho ótimo da partícula depende da porosidade da rocha hospedeira e de sua resistividade. Além disso, os então denominados sulfetos maciços são geralmente heterogêneos, sendo intercamados com rocha hospedeira de menor condutividade. A característica mais importante é que a mineralização disseminada oferece boa resposta IP e outros métodos elétricos não trabalham muito bem nessas circunstâncias.

4.2.1.2 Polarização de Membrana

No efeito de polarização de membrana a condução eletrolítica é o fator predominante, sendo a única forma de condução onde metais não estão presentes e a frequência é baixa. Portanto, a polarização de membrana ocorre em rochas pobres em substâncias metálicas, em que a presença de minerais de argila promove uma mobilidade dos íons dispersos no eletrólito. A maioria dos minerais das rochas tem uma rede de cargas negativas na interface superfície-fluido do poro. Consequentemente os íons positivos são atraídos e os negativos são repelidos por essa interface. Essa concentração de íons positivos chamada “nuvem catiônica”, pode se estender na zona do fluido até a profundidade da espessura do próprio poro, como mostra a Figura 4.7a. Se isso ocorrer, quando um campo elétrico for aplicado, os íons negativos se acumularão em uma extremidade da zona, e deixarão a outra vazia. Como resultado dessa distribuição de polarização, o fluxo de corrente é impedido pela “nuvem catiônica”, como ilustrado na Figura 4.7b. Quando a corrente é interrompida os íons retornam as suas posições originais em um intervalo de tempo finito (Telford et.al., 1990).

O efeito IP de membrana é mais pronunciado na presença de minerais de argila, nos quais os poros são particularmente pequenos. A magnitude da polarização, no entanto, não cresce de forma constante com a concentração de minerais de argila, mas atinge um máximo e então começa a decrescer. Isso ocorre porque deve haver uma passagem alternativa maior no material, onde não ocorre o acúmulo de íons, caso contrário tanto o fluxo de corrente como a polarização seriam reduzidos. O aumento da salinidade do fluido do poro também provoca uma queda no efeito de polarização (Telford et.al., 1990).

Como resultado desses fatores, a polarização de membrana é geralmente máxima em rochas contendo minerais argilosos dispersos em uma matriz relativamente menor ($\leq 10\%$) e nas quais o eletrólito tem alguma salinidade.

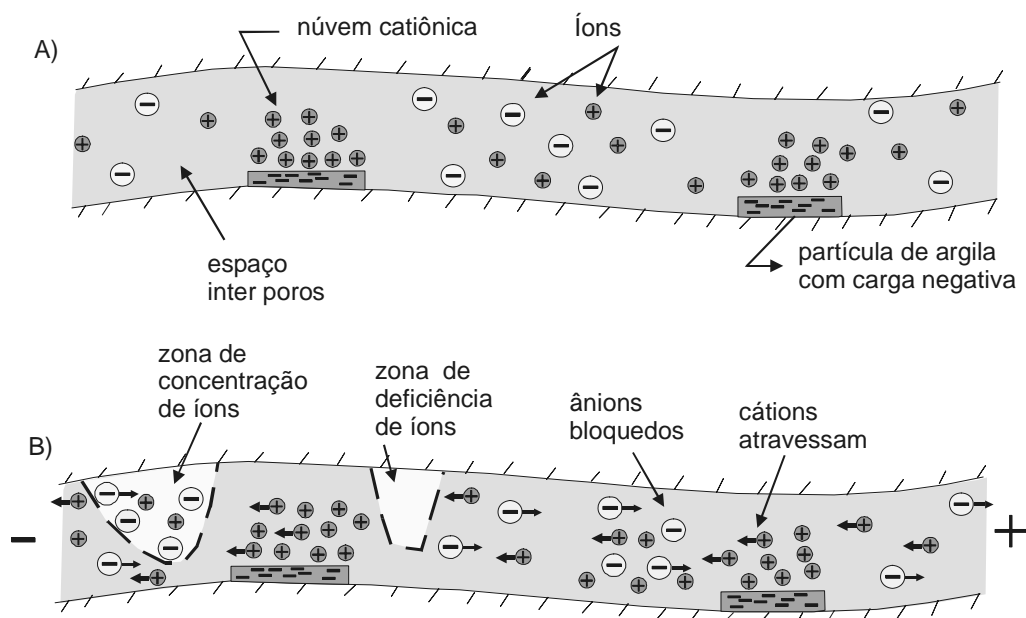


Figura 4.7 - Efeito de polarização de membrana. a) Distribuição normal de íons em um arenito poroso; b) Polarização de membrana em um arenito poroso devido à aplicação de voltagem em corrente contínua (Adaptado de Telford et.al., 1990).

Outras fontes de polarização padrão incluem efeitos dielétricos e eletrocinéticos normais, presença de minerais condutores em quantidades muito pequenas, e possível condução superficial em material normalmente não condutor. Entre essas fontes, a resposta eletrocinética devido a variações nas seções dos poros e que afetam o fluxo de fluido, é provavelmente mais significativa que as outras. Nenhuma dessas fontes, no entanto, é comparável em magnitude à polarização de membrana.

4.2.2 Aquisição dos dados de Resistividade e Polarização Induzida

Os métodos da eletroresistividade e polarização induzida envolvem medidas de uma impedância, com subsequente interpretação em termos de propriedades elétricas da subsuperfície e, finalmente, de subsuperfície geológica.

Os equipamentos utilizados para a realização de ensaios de IP normalmente fazem simultaneamente medidas de resistividade, pois os dados utilizados para medir o efeito de IP são os mesmos usados para calcular a resistividade. Estes equipamentos compreendem uma fonte

controlada para emissão de corrente elétrica, acoplada a um gerador (necessário para a emissão de correntes suficientemente altas para que seja possível a análise da curva de descarga) e uma unidade receptora que executa os trabalhos de captação das tensões geradas, compensação do potencial espontâneo (pois como os parâmetros de interesse são tensões residuais da curvas de descarga, o potencial espontâneo é um fator indesejável) e a sincronização automática, através dos eletrodos, ao conjunto de emissão. A potência da fonte pode variar de centenas de watts até alguns kilowatts. O circuito emissor pode medir valores entre 5 e 500 mA, e o potencial normalmente lido no circuito receptor varia entre 10 mV a 20 V. Esses equipamentos podem trabalhar com corrente contínua ou corrente alternada de baixa frequência, preferivelmente menor que 60 Hz (Telford, *et. al.*, 1990).

Neste trabalho foi utilizado um resistivímetro fabricado pela *Iris Instruments*, modelo *Syscal R2* (Figura 4.8), que mede a voltagem aplicada e valores da curva de decaimento da voltagem, fornecendo dados de resistividade e cargabilidade.



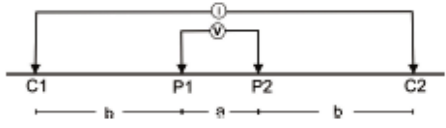
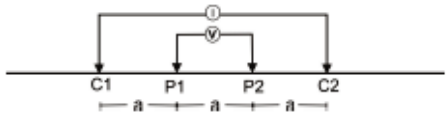
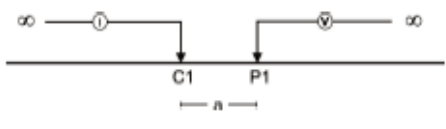
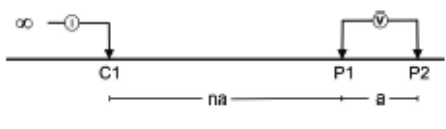
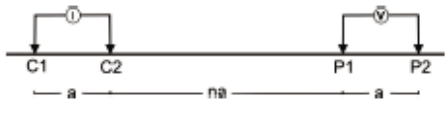
Figura 4.8 - Equipamento Iris Syscal R2, conversor de voltagem, e sistema de emissão e recepção, utilizado para a realização dos ensaios de eletroresistividade e caminhamento IP.

Os dados de cargabilidade são normalmente interpretados juntamente com os dados de resistividade, utilizando os mesmos softwares. A interpretação conjunta IP/resistividade busca refinar a resposta geofísica frente ao problema geológico, diminuindo a ambigüidade. Em áreas com problemas de contaminação podem-se identificar zonas de diferentes texturas (Braga, 1997) e também de maior concentração de contaminantes, onde pode ocorrer a infiltração de líquidos percolados nas camadas de solo (Rosqvist, *et. al.*, 2003).

As medidas são normalmente realizadas com um arranjo de quatro eletrodos. Uma corrente elétrica artificial é aplicada no terreno através de dois eletrodos (denominados C1 e C2), e o potencial gerado é medido em outros dois eletrodos (denominados P1 e P2), de maneira a determinar a resistividade real ou aparente em subsuperfície.

Todos os arranjos geométricos usados para obter a resistividade e a cargabilidade aparente são baseados na equação 4.9. Um resumo dos arranjos mais utilizados é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Arranjos eletródicos mais utilizados (modificado de Ustra, 2008).

Arranjo	Posição dos eletrodos	Fator geométrico
Schlumberger		$K = \pi \cdot b \cdot (b + 1) \cdot a$
Wenner		$K = 2 \cdot \pi \cdot a$
Pólo-pólo		$K = 2 \cdot \pi \cdot a$
Pólo-dipolo		$K = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot a$
Dipolo-dipolo		$K = \pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) \cdot a$

4.2.2.1 Caminhamento Elétrico

A técnica de caminhamento elétrico (CE) se baseia na análise e interpretação de um parâmetro físico obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno. Este tipo de aquisição obtém a variação lateral de resistividade em profundidades aproximadamente constantes. Isso é alcançado fixando-se um espaçamento de eletrodos e caminhando com estes ao longo de perfis e efetuando as medidas.

O arranjo de campo utilizado para os ensaios de caminhamento elétrico neste trabalho foi o denominado dipolo-dipolo. Nesse arranjo, o estudo da variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis teóricos, obtendo-se uma caracterização dos materiais em subsuperfície, tanto horizontal quanto verticalmente.

As principais características do arranjo dipolo-dipolo são que os espaçamentos entre os eletrodos são sempre iguais, isto é $AB=MN=x$, e normalmente utiliza-se um conjunto de dipolos de recepção, sendo a distância entre os dipolos de emissão um múltiplo da distância x , o que determina o nível teórico investigado.

Dahlin e Zhou (2004) simulam numericamente a aquisição 2D com diversos arranjos eletródicos e avaliam suas vantagens e limitações, considerando a sensibilidade a ruído e efeitos de anomalia. O efeito de anomalia é utilizado na avaliação da eficiência da medição de um arranjo e considera-se que este deve ser significativamente maior do que o nível de ruído local. Os autores concluem que os efeitos de anomalia para os diferentes arranjos variam com a geologia local, e recomendam os arranjos pólo-dipolo, dipolo-dipolo e Schlumberger, entre outros, para levantamentos 2D, sendo que a escolha final deve ser determinada pela geologia local, objetivo da investigação e considerações logísticas.

A Figura 4.9 ilustra a disposição inicial do arranjo dipolo-dipolo ao longo de uma linha a ser estudada. Podem-se observar vários dipolos de recepção (MN) instalados na superfície do terreno. Cada par de dipolos MN, em relação ao dipolo AB, representa um nível de investigação. Portanto, quanto mais dipolos de MN instalados, maior será a profundidade de investigação.

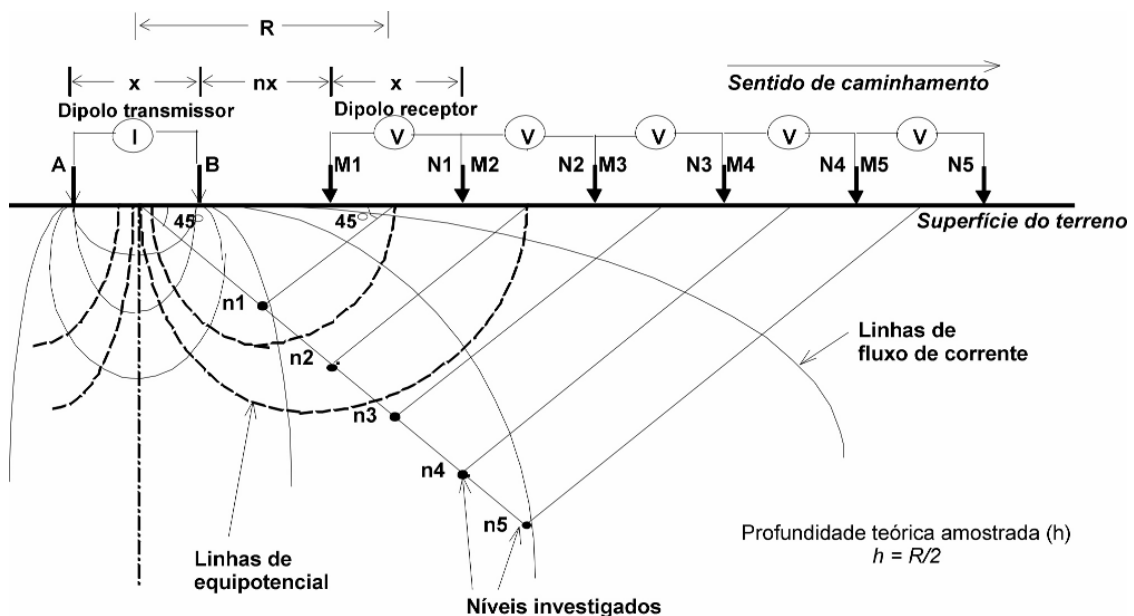


Figura 4.9 - Disposição inicial no campo do arranjo dipolo-dipolo.

Entretanto, deve-se ressaltar que, como nesse tipo de arranjo, o potencial diminui sensivelmente à medida que nos afastamos do dipolo AB, as leituras mais afastadas se tornarão difíceis de serem obtidas com precisão. O arranjo dipolo-dipolo é considerado por Dahlin e Zhou (2004) como um arranjo que apresenta boa resolução, porém mais suscetível à contaminação por ruído.

No sistema de plotagem dos dados, o ponto de atribuição da leitura é tomado como o ponto médio entre os dipolos AB e MN, locado em função de uma projeção de 45° a partir dos centros desses dipolos. Após a plotagem de todos os parâmetros físicos obtidos em um perfil levantado, tem-se uma seção geométrica aparente (resistividade e/ou cargabilidade).

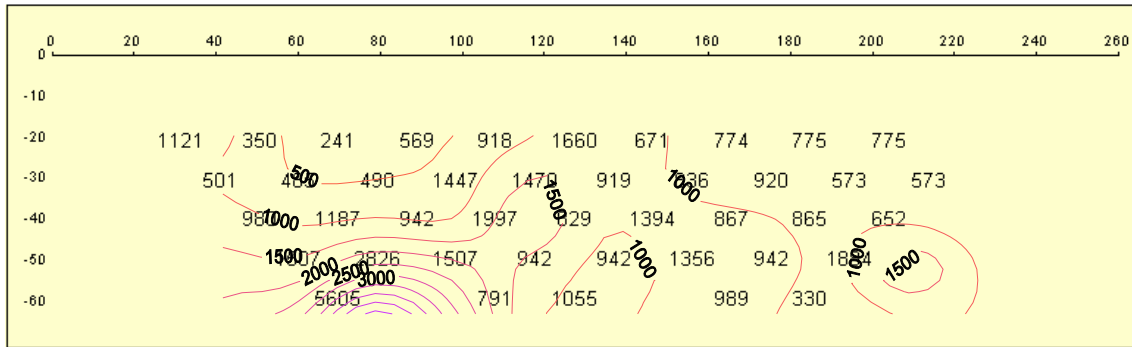
Barker (1989) discute diversos conceitos do termo “profundidade de investigação”, e argumenta que, na prática, a profundidade de investigação de um arranjo eletródico é a profundidade com a qual uma medida de resistividade aparente feita na superfície pode ser melhor associada. Dahlin & Zhou (*op.cit.*) ressaltam que a profundidade de investigação de um determinado arranjo, assim como a resolução do imageamento, não depende apenas do tamanho dos dipolos, mas também da geologia local (propriedades elétricas e geometria do corpo anômalo) e do nível de ruído.

4.2.3 Interpretação dos Dados

4.2.3.1 Interpretação Qualitativa

A interpretação de dados geofísicos pode ser realizada de forma qualitativa e quantitativa e não é diferente para investigações 2D quando se utiliza os métodos da eletroresistividade e da polarização induzida. A interpretação qualitativa 2D para os métodos da eletroresistividade e o método IP tem como objetivo identificar, diferenciar e delimitar zonas anômalas em dados de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente.

Mais comumente, os resultados obtidos através dos métodos citados acima são plotados graficamente e levam a denominação de “Pseudo-seção” de resistividade elétrica aparente e/ou cargabilidade aparente (Figura 4.10). Essa técnica é proposta por Hallof (1957, apud Griffiths & Barker, 1994), onde cada ponto investigado na subsuperfície possui uma posição e profundidade teórica específica, de acordo com o espaçamento entre eletrodos e o arranjo eletródico utilizado na investigação.



Atualmente, através da implementação da teoria da inversão através de algoritmos computacionais e também do avanço tecnológico dos microprocessadores, a agilidade e a capacidade de processamento matemático para um grande volume de dados é possível. A Figura 4.11 ilustra a rotina básica de um algoritmo de inversão para dados de resistividade elétrica (Narayan et.al., 1994).

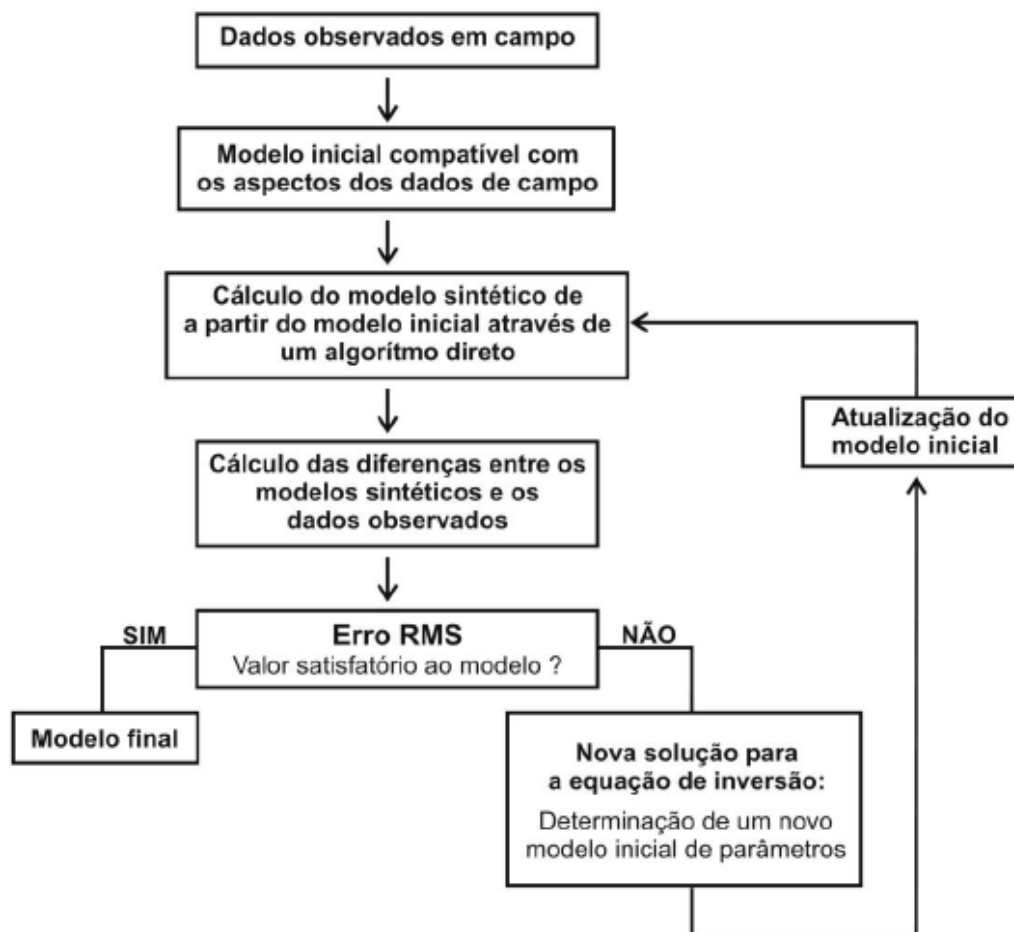


Figura 4.11 - Rotina básica para um algoritmo de inversão de dados de resistividade elétrica (Adaptado de Narayan, et. al., 1994; Fachin, 2007).

De acordo com Olayinka & Yaramanci (2000) há dois tipos de inversão mais utilizados na interpretação de dados de eletroresistividade e IP: a inversão por suavização (*smooth inversion*) e a inversão por blocos ou polígonos (*block inversion*). Estes tipos de inversão 2D de dados de resistividade elétrica e IP estão implementados comercialmente nos *softwares* RES2DINV (GEOTOMO SOFTWARE, 2003) e RESIX IP2DI (INTERPEX, 1996), respectivamente. Abordaremos neste trabalho somente o método da inversão por suavização, método implementado no *software* RES2DINV (*op.cit.*), para a interpretação quantitativa dos dados adquiridos nesta pesquisa.

O *software* de inversão 2D de dados de resistividade elétrica e cargabilidade, RES2DINV (*op. cit.*) faz uso do método da inversão por suavização utilizando o método matemático dos mínimos quadrados.

De acordo com Loke & Barker (1996) o método matemático da inversão por suavização utilizando o método de mínimos quadrados (*smoothness-constrained least squares method*) utiliza a inversão baseada em células, ou seja, o *software* reconhece a subsuperfície terrestre como blocos retangulares (*grid*) possuindo valores constantes para o parâmetro investigado.

O arranjo dos blocos está vinculado ao número de pontos investigados em subsuperfície, baseado na pseudo-seção de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente (posição e profundidade teórica dos pontos investigados) (Loke & Barker, *op.cit.*). A profundidade teórica para cada ponto investigado é diferente para cada espaçamento entre eletrodos e também para cada arranjo eletródico. O *software* RES2DINV (*op.cit.*) se baseia nos critérios definidos por Edwards (1977) para estimar as profundidades de investigação. O modelo 2D usado pelo programa divide a subsuperfície em uma série de blocos retangulares com o objetivo de determinar as resistividades dos blocos retangulares que irão produzir uma seção de resistividade modelada concordante com os dados de campo.

A Figura 4.12 ilustra a malha retangular e a posição dos blocos que simulam a subsuperfície terrestre. Para a realização do cálculo da matriz de dados o *software* se utiliza dos métodos Gauss-Newton e *quasi-Newton* (Loke & Barker, 1996).

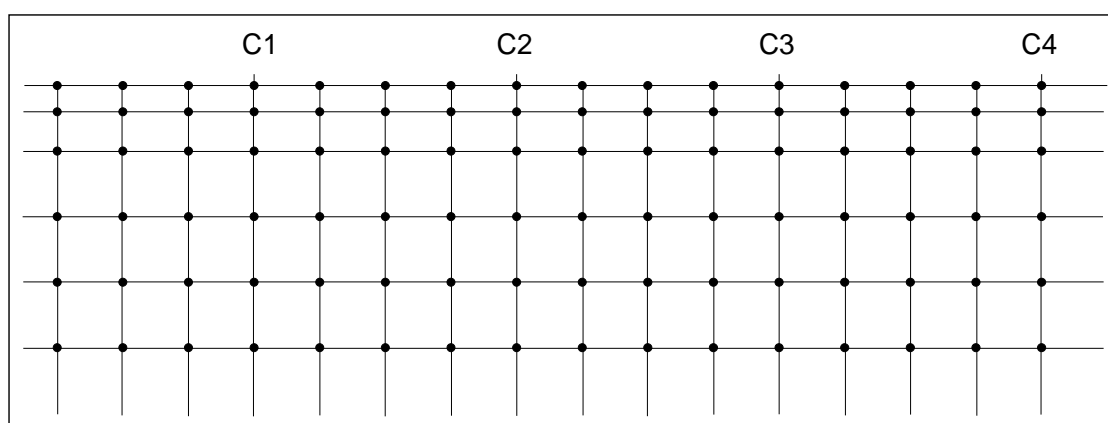


Figura 4.12 - Parte da rede de células bidimensional utilizada para a modelagem 2D, mostrando as posições dos eletrodos (modificado de Loke, 1999).

4.2.4 Fontes de Ruído da Eletroresistividade e Polarização Induzida

Segundo Zhou & Dahlin (2003) a confiabilidade e resolução do imageamento são essencialmente afetadas pelo ruído inerente aos métodos da eletroresistividade e polarização induzida e dependem de todos os aspectos do trabalho de campo. Um nível de ruído subestimado pode fazer com que a inversão falhe no ajuste dos dados e a imagem resultante se torne ruim e contaminada por artefatos. Por outro lado, um nível de ruído superestimado pode diminuir substancialmente a resolução do imageamento. As principais fontes de ruídos são descritas a seguir.

Polarização de eletrodo – Uma das principais fontes de ruído que pode diminuir a qualidade dos dados de resistividade e cargabilidade é o efeito de polarização de eletrodo, atribuído ao acúmulo de carga na interface entre o metal condutor do eletrodo e o solo. Esse efeito, que ocorre quando um eletrodo é usado para transmitir corrente, deve ser levado em conta se o mesmo eletrodo for subsequentemente usado para medir potencial. No efeito de polarização de eletrodo, várias ordens de magnitude maiores do que o sinal induzido permanece em níveis significativos por dezenas de minutos em solos naturais (Dahlin, 2000). Esse efeito pode ser evitado separando os eletrodos utilizados somente para a transmissão de corrente dos eletrodos utilizados para a medida de potencial.

Segundo Ustra (2008), uma maneira de minimizar a contaminação dos dados pelo ruído gerado pela polarização de eletrodo é utilizar dois eletrodos metálicos como eletrodos de corrente, e eletrodos não-polarizáveis como eletrodos de potencial. Os eletrodos não-polarizáveis consistem em um metal imerso em solução saturada do seu próprio sal, dentro de um recipiente poroso que permite que a solução vazze lentamente e faça contato com o solo. Na presente pesquisa, utilizou-se eletrodos porosos com uma haste de cobre (Cu) imersa em uma solução de sulfato de cobre (CuSO₄) como ilustra a Figura 4.13.

Polarização espontânea – São variações de voltagem naturais do solo, causadas por correntes telúricas ou reações eletroquímicas na subsuperfície. Devem ser medidos e eliminados das leituras de potencial (Sumner, 1976). Correntes telúricas são correntes naturais de baixa frequência que se estendem por vastas áreas. Em medidas no domínio do tempo esse ruído é reduzido pelo valor médio das leituras sobre vários ciclos de decaimento (Telford et.al., 1990).

Ruídos antrópicos – Podem ser considerados como fontes de ruído equipamentos elétricos próximos a áreas de levantamento como, por exemplo, linhas de transmissão de energia, cercas elétricas, etc.

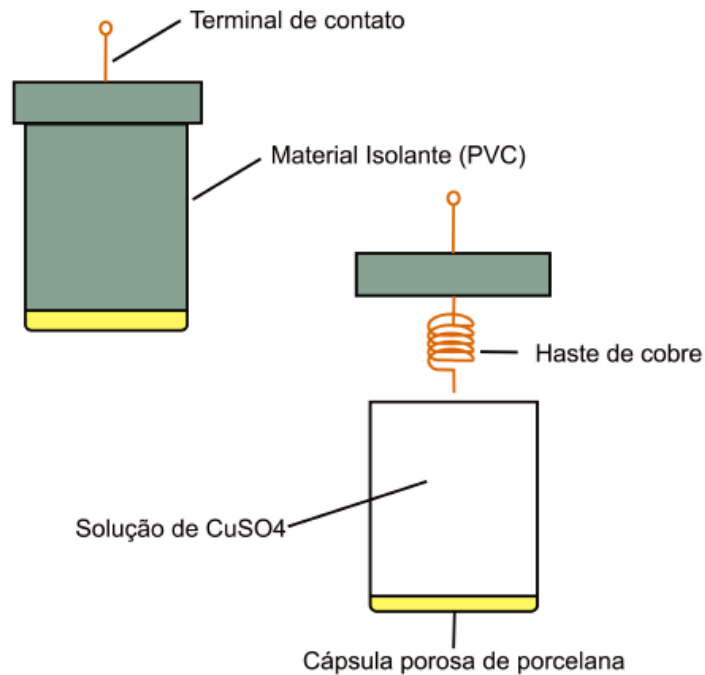


Figura 4.13 - Eletrodos não polarizáveis (modificado de Ustra, 2008).

Acoplamento capacitivo – Ocorre entre os eletrodos de corrente e cabos de potencial, ou vice-versa, como resultado de fuga de corrente. O efeito é normalmente suficientemente pequeno e pode ser desprezado, a não ser que os cabos estejam danificados ou muito próximos aos eletrodos (Telford et.al., 1990). Para minimizar esse efeito, o cabo de potencial deve estar bem separado do eletrodo de corrente.

Acoplamento eletromagnético – Resulta de indutância mútua entre os cabos de corrente e potencial. Esse efeito pode ser grande na utilização de cabos longos ou altas frequências. O acoplamento eletromagnético é particularmente importante no método da polarização induzida e pode ser facilmente minimizado no domínio do tempo, estabelecendo um atraso entre os instantes do corte de corrente e início da medida do decaimento da voltagem (Sumner, 1976). O arranjo dipolo-dipolo é o menos influenciado por esse efeito, onde os dipolos de corrente e potencial são ambos pequenos em extensão e permanecem distantes um do outro (Sharma, 1997).

4.2.5 Fontes de Erro das Medidas de Eletroresistividade e Polarização Induzida

Para aplicar a técnica de imageamento com sucesso, deve-se ter muita atenção no controle dos dados observados no trabalho de campo e seu processamento e todas as medidas para minimizar os efeitos de todas as fontes de erros devem ser tomadas. No geral, os erros de medição podem ser classificados em dois tipos: (a) erros no espaçamento dos dipolos e (b) erros na leitura do potencial.

Erros no espaçamento dos dipolos são causados pelo erro no posicionamento dos eletrodos e podem ser minimizados com um trabalho cuidadoso da equipe.

Erros na leitura do potencial surgem a partir de muitas fontes, como mau contato do eletrodo, danos no cabo, ruído natural, problemas instrumentais (corrente errada, mau contato) e instrumentos inadequados.

Segundo Zhou & Dahlin (2003), dois métodos podem ser adotados para checar a qualidade dos dados. O primeiro é repetir a observação e calcular a média, mediana e desvio padrão como uma estimativa do erro do dado. Outra alternativa é usar a medida normal e recíproca do ponto. Teoricamente, sem nenhum ruído a medida normal e recíproca deveriam ter o mesmo valor.

4.3 Método Eletromagnético Indutivo

A partir da década de 80 o método eletromagnético indutivo passou a ser extensamente aplicado em estudos de detecção e monitoramento da poluição gerada por resíduos industriais e urbanos (Benson, *et. al.*, 1982; Ellert, *et. al.*, 1990). Através dos equipamentos EM-31, EM-34 e EM-38, que são individualizados pela frequência de operação, são realizadas medidas diretas da condutividade do terreno em profundidades teóricas pré-estabelecidas. Dessa forma, como na maioria dos casos a presença de poluentes causa um aumento na condutividade elétrica, esses podem ser rapidamente detectados e mapeados. De acordo com McNeil (1980), uma adição de 25 ppm de material na água subterrânea causa um aumento da condutividade em aproximadamente 1 mS/m. O método eletromagnético indutivo tem-se mostrado como uma ferramenta rápida e de baixo custo para estudos de áreas com influência de contaminação.

O método eletromagnético indutivo envolve a medida de uma ou mais componentes induzidas dos campos magnético ou elétrico na subsuperfície, por um campo magnético artificial de corrente alternada (Borges, 2007) e determina a condutividade elétrica dos materiais em subsuperfície utilizando o princípio da indução eletromagnética de baixo número (Benson & Stubben, 1995).

Esse método caracteriza-se pelo uso de equipamentos de operação muito simples, rápida e de baixo custo, o que tem levado a uma extensa aplicação do método em estudos ambientais como mapeamento de plumas de contaminação (Goldstein *et.al.*, 1990; Elis, 1999; Aquino, 2000), detecção de cavidades (Doolittle & Collins, 1998), exploração arqueológica (Dalan, 1991; Gomes, 2003), entre outros.

Uma das principais limitações desta técnica é o ruído produzido pela interação do campo eletromagnético gerado pelo equipamento com estruturas metálicas, fios de alta tensão, tambores metálicos e outras estruturas (McNeill, 1980). Essa interação resulta em valores de condutividade aparente incoerentes, o que torna o uso desta técnica limitado em centros urbanos, instalações industriais, entre outros.

4.3.1 Fundamentos Teóricos

Os campos eletromagnéticos têm duas componentes diretamente mensuráveis: os campos elétrico e magnético que no espaço livre podem ser descritos em termos de vetores de intensidade de campo E e H , ou de vetores de densidade de fluxo D e indução magnética B . Esses campos são funções da posição (r, x, y, z) e do tempo t (segundos), ou da frequência f (Hz).

O campo EM é considerado como uma manifestação da distribuição e comportamento de cargas elétricas. Essa distribuição é dada pela Lei de Coulomb, descrita na forma diferencial:

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \vec{E} = q \quad (\text{Eq. 4.12})$$

O fluxo de corrente é descrito pelo vetor densidade de corrente elétrica J . Ele gera um campo magnético ao seu redor, conforme a lei de Ampère. A densidade de corrente J depende linearmente da intensidade do campo elétrico, conforme a Lei de Ohm:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Sendo σ a condutividade elétrica.

O acoplamento dos campos E e H são descritos pelas Leis de Ampère e Faraday. A Lei de Ampère descreve que o campo magnético é produzido por correntes elétricas.

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Onde: $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ é a corrente de deslocamento e J é a densidade de corrente.

Na Lei de Faraday o campo elétrico (E) é produzido pela variação da indução magnética (B) em relação ao tempo.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Para prospecção EM em baixas frequências, o campo magnético gerado pelo termo da corrente de deslocamento é usualmente desprezível. No método EM indutivo, faz-se circular uma corrente alternada em uma bobina, que por sua vez cria um campo magnético que induz correntes

em superfície. Essas correntes, interagindo com o meio geológico terão como resposta um segundo campo magnético que traz informações sobre o terreno.

O princípio de operação do método EM, baseado na descrição de Sheriff (1989), está esboçado na Figura 4.14. Quando uma bobina transmissora (Tx) energizada com uma corrente alternada em uma frequência de áudio é colocada em um meio uniforme e uma bobina receptora (Rx) está localizada a uma distância curta, o campo magnético variante, no tempo proveniente da corrente alternada da bobina transmissora, induz fracas correntes no solo (*eddy currents*). Estas correntes geram um campo magnético secundário (Hs) que é sentido junto com o campo magnético primário (Hp) pela bobina receptora. Segundo Borges (2007), o campo magnético secundário tem a mesma frequência do transmissor, mas está fora de fase. O campo na bobina receptora é uma resultante, ou uma soma de vetores de dois componentes. Considerações elementares da teoria eletromagnética requerem que o atraso do campo magnético secundário com o primário seja menos do que 90° , entretanto, se o campo magnético for proveniente de um excelente condutor (materiais metálicos), o atraso será quase 180° .

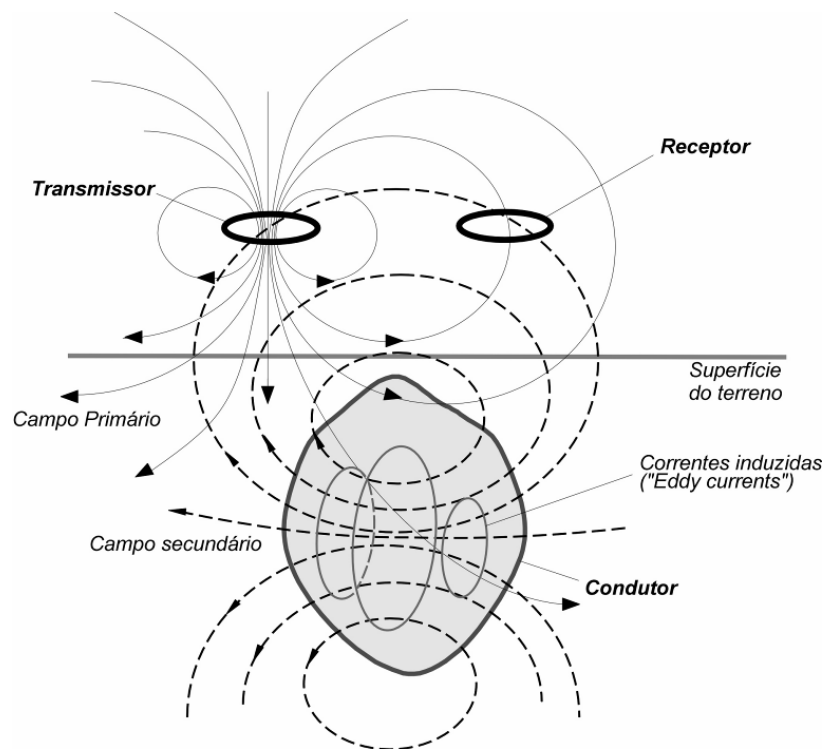


Figura 4.14 - Princípio de indução eletromagnética. A bobina transmissora, energizada com uma corrente alternada, produz um campo magnético primário (Hp), que induz correntes secundárias no condutor em subsuperfície. A bobina receptora mede a resultante entre Hp e Hs (modificado de Sheriff, 1989).

Segundo Maclean et.al. (1991), quando a bobina transmissora e a receptora estão do mesmo lado do condutor, Hp e Hs serão somados e o campo resultante é maior do que o medido na

ausência de um condutor, entretanto quando eles estão em lados opostos, H_s se opõe a H_p e o resultado é uma anomalia “negativa”.

A magnitude de H_s pode ser descrita como uma porcentagem de H_p proveniente da bobina transmissora. O ângulo de fase (φ , Figura 4.15) é obtido entre H_p e H_r (resultante de H_p com H_s).

A parte real, ou em fase de H_s , é representada pela projeção de H_s no eixo horizontal da Figura 4.15 ($H_s \cos\theta$) e que está 180° fora de fase com H_p . Já a projeção de H_s no eixo Y da Figura 4.15 ($H_s \sin\theta$) representa um componente de H_s que está 90° fora de fase com H_p . Essa é uma componente quadratura (imaginária) ou fora de fase.

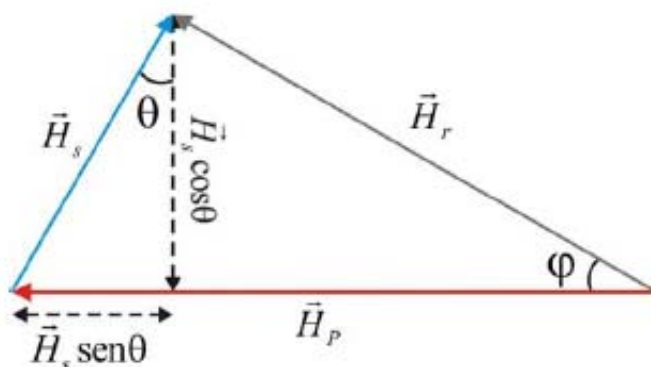


Figura 4.15 - Diagrama de respostas eletromagnéticas (modificado de Borges, 2007).

A razão do espaçamento entre as bobinas (s) dividido pelo skin depth (δ) é conhecido como o “número de indução” (B).

$$B = s/\delta \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Quando o número de indução é muito menor do que 1, então a razão entre H_s e H_p no receptor é diretamente proporcional à condutividade aparente (σ_a). Nestas condições, conhecidas como *operação a baixo número de indução* (McNeil, 1980), o valor de condutividade elétrica aparente do terreno pode ser calculado pela equação:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (\text{Eq. 4.17})$$

onde:

σ_a = a condutividade aparente (mS/m)

$\omega = 2\pi f$, sendo f (Hz)

μ_0 = permeabilidade magnética no vácuo

s = espaçamento entre as bobinas (m)

4.3.2 Aquisição dos Dados Eletromagnéticos

O mais comum sistema eletromagnético utilizado em investigações geofísicas de engenharia e ambiental é o método de bobina dupla de fonte móvel (*moving-source dual-coil method*, McNeill, 1990). Duas bobinas separadas e conectadas por um cabo de referência fornecem a base do sistema. Uma bobina serve como um transmissor, para gerar um campo magnético primário, e outra atua como um receptor, que mede tanto o campo primário quanto o campo secundário. A separação entre as bobinas é mantida fixa e o par de bobinas é movido ao longo de um perfil, em intervalos discretos. O ponto de referência para a medida é, frequentemente, o centro entre as bobinas. Os sistemas de dupla bobina possuem inúmeras combinações de orientação de bobinas, como ilustra a Figura 4.16 (Borges, 2007), entretanto somente duas configurações serão estudadas neste trabalho: a vertical coplanar (dipolo magnético horizontal – DMH) e a horizontal coplanar (dipolo magnético vertical – DMV).

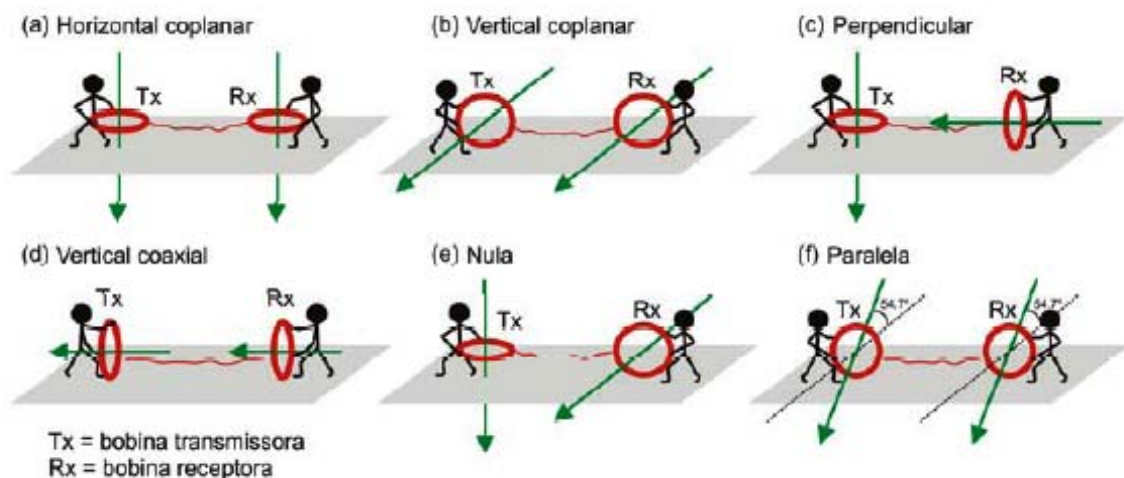


Figura 4.16 - Seis configurações comuns de antenas dipolares: (a) horizontal coplanar, (b) vertical coplanar, (c) perpendicular, (d) vertical coaxial, (e) nula, (f) paralela (modificado de Borges, 2007).

O equipamento utilizado neste trabalho é o *EM-34*, da Geonics. Ele é composto por duas bobinas: uma transmissora, Tx, e outra receptora, Rx. Acoplada à bobina transmissora existe um módulo de controle e emissão de corrente elétrica, MC, alimentado por uma bateria. À bobina receptora está acoplado um módulo de leitura, ML. Os módulos são ligados por um cabo de referência, CR. Na Figura 4.17 pode-se observar o equipamento *EM-34*.



Figura 4.17 - Equipamento *EM-34* composto por duas bobinas (transmissora e receptora), um módulo de controle e emissão de corrente elétrica, e um módulo de leitura.

As frequências de operação do *EM-34*, bem como as profundidades de investigação, variam de acordo com a disposição e o espaçamento entre as bobinas, o que resulta nas relações apresentadas na Tabela 4.2, abaixo.

Tabela 4.2 - Espaçamento entre bobinas, frequência de operação e profundidade de investigação de acordo com a disposição das bobinas.

Espaçamento entre as bobinas	Frequências de Operação	Profundidade de exploração para Dipolo Horizontal	Profundidade de exploração para Dipolo Vertical
10 m	6,4 kHz	7,5 m	15 m
20 m	1,6 kHz	15 m	30 m
40 m	0,4 kHz	30 m	60 m

Os ensaios de campo podem ser efetuados na forma de sondagens ou caminhamentos que, devido à praticidade de operação e transporte dos equipamentos, são realizados com muita rapidez. As sondagens necessitam de variação de frequência e espaçamento entre as bobinas transmissora e receptora, ao passo que, no caminhamento, esses parâmetros são constantes, variando, somente o ponto de amostragem espacial. Outro modo de realizar sondagens é variando a altura do

equipamento ao solo, entretanto só é realizada com os equipamentos de maior frequência (EM-31 e EM-38).

Como as profundidades de investigação são pré-determinadas, os equipamentos são bastante limitados para a execução de sondagens. Os dados de condutividade podem ser plotados em perfis, em função da distância, e um conjunto de perfis permite a confecção de mapas. A interpretação desses dados é qualitativa, porém existem em desenvolvimento softwares para quantificação desses dados.

4.4 Aquisição dos Dados Bacteriológicos

Foram realizadas análises microbiológicas em amostras de solo retiradas de regiões que mostraram anomalias de resistividade e IP, observadas nas seções de resistividade elétrica e IP. Os resultados destas análises serviram para correlacionar uma possível biodegradação nestas regiões com as anomalias medidas.

Para a amostragem de resíduos sólidos (solo) utilizaram-se os procedimentos descritos na NBR 10.007 (ABNT 1987). Foram executados furos de sondagem com trado manual (Figura 4.18) e as coletas de amostras foram realizadas nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros. Em cada ponto amostrado foi coletado cerca de 500g de amostra que foi devidamente armazenada em embalagem plástica limpa e identificada. A cada nova amostra coletada o trado era devidamente lavado com água deionizada e sabão neutro para evitar a contaminação de uma amostra para outra (Figura 4.19). Posteriormente as amostras foram conservadas sob refrigeração até a temperatura de 4°C em caixa térmica com gelo até o momento da entrega no laboratório. As análises de bactéria foram realizadas pelo Instituto Agrônomo no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais e os boletins de análise podem ser visualizados no ANEXO II.



Figura 4.18 - Foto mostrando a execução dos furos de sondagem com trado manual para a coleta das amostras de solo.



Figura 4.19 - Foto mostrando que a cada nova amostra coletada o trado era devidamente lavado para evitar a contaminação de uma amostra para outra.

CAPÍTULO 5

5 Apresentação e Discussão dos Resultados

Este projeto tem como principal finalidade a caracterização geolétrica da área contaminada da indústria química, através da aplicação e integração dos métodos geofísicos eletroresistividade, polarização induzida e eletromagnético indutivo. Também será avaliado se esta metodologia é eficiente na avaliação e caracterização de problemas ambientais.

Para isso, foi necessária a utilização de um grande volume de informações e dados geofísicos.

Serão analisados os seguintes conjuntos de dados:

- ✓ Análises químicas de água subterrânea;
- ✓ Dados eletromagnéticos - 10 (dez) caminhamentos eletromagnéticos;
- ✓ Dados elétricos - 5 (cinco) caminhamentos elétricos (resistividade e IP);
- ✓ Dados bacteriológicos – obtidos através de análises químicas de 6 (seis) sondagens à trado.

Através dos resultados das análises químicas de água subterrânea, obtidas através de trabalhos realizados anteriormente na área, foram identificados os locais mais problemáticos em relação à contaminação, que serviram de guia para a realização dos levantamentos geofísicos. Também foram realizados levantamentos geofísicos próximos a uma barreira hidráulica instalada a jusante da área da indústria. Esta barreira de poços estende-se por uma distância de aproximadamente 500 metros e atua no processo de remediação com o objetivo de bombear a água contaminada e direcionar este conteúdo até uma estação de tratamento de água (ETA).

Com os dados de caminhamentos eletromagnéticos (EM) foram elaboradas pseudo-seções e mapas de caracterização geral, em diferentes profundidades, utilizando os dados de todas as linhas. Com isso foram obtidas informações do comportamento da pluma de contaminação da área como um todo.

A partir dos dados dos caminhamentos elétricos (CE) (resistividade e polarização induzida) foram geradas seções 2D para entender as relações entre a contaminação e o meio natural, na área interna e externa da indústria química.

Nas regiões onde ficaram evidenciadas anomalias de resistividade, observadas através das seções de resistividade elétrica e IP, foram realizadas análises microbiológicas. Os resultados destas análises serviram para correlacionar uma possível biodegradação nestas regiões com as alterações significativas nas medidas de resistividade e IP.

5.1 Dados Eletromagnéticos

O levantamento geofísico para a coleta dos dados eletromagnéticos foi conduzido nas áreas onde foram constatados os níveis mais elevados de contaminação. Esta verificação foi feita através das análises químicas de água subterrânea que foram realizadas na área estudada por projetos executados anteriormente. A Figura 5.1 mostra o local onde foram realizados os levantamentos eletromagnéticos.

Foram realizadas 10 (dez) linhas de caminhamentos eletromagnéticos (EM 00 a EM 08) localizados tanto nas regiões mais contaminadas, como também em suas margens.

As linhas de caminhada eletromagnético EM 00, EM 01, EM 02, EM 03 e EM 05 foram realizadas na porção mais ao norte da indústria, como é visualizado na Figura 5.2. A linha EM 04 foi realizada fora da área da indústria, à oeste das linhas anteriormente citadas, próxima a barreira de poços (Figura 5.2). Foram realizadas duas campanhas de caminhada neste local. As linhas de caminhada foram então denominadas EM 4.1 e EM 4.2. Ambas foram executadas no mesmo local, porém, a linha EM 4.1 foi feita antes da barreira de poços entrar em operação, e a linha EM 4.2 foi feita com a barreira de poços em pleno funcionamento. O sentido de caminhada das linhas EM 00, EM 01, EM 02 e EM 03 é de nordeste para sudoeste, enquanto que das linhas EM 04 e EM 05 é de norte para sul.

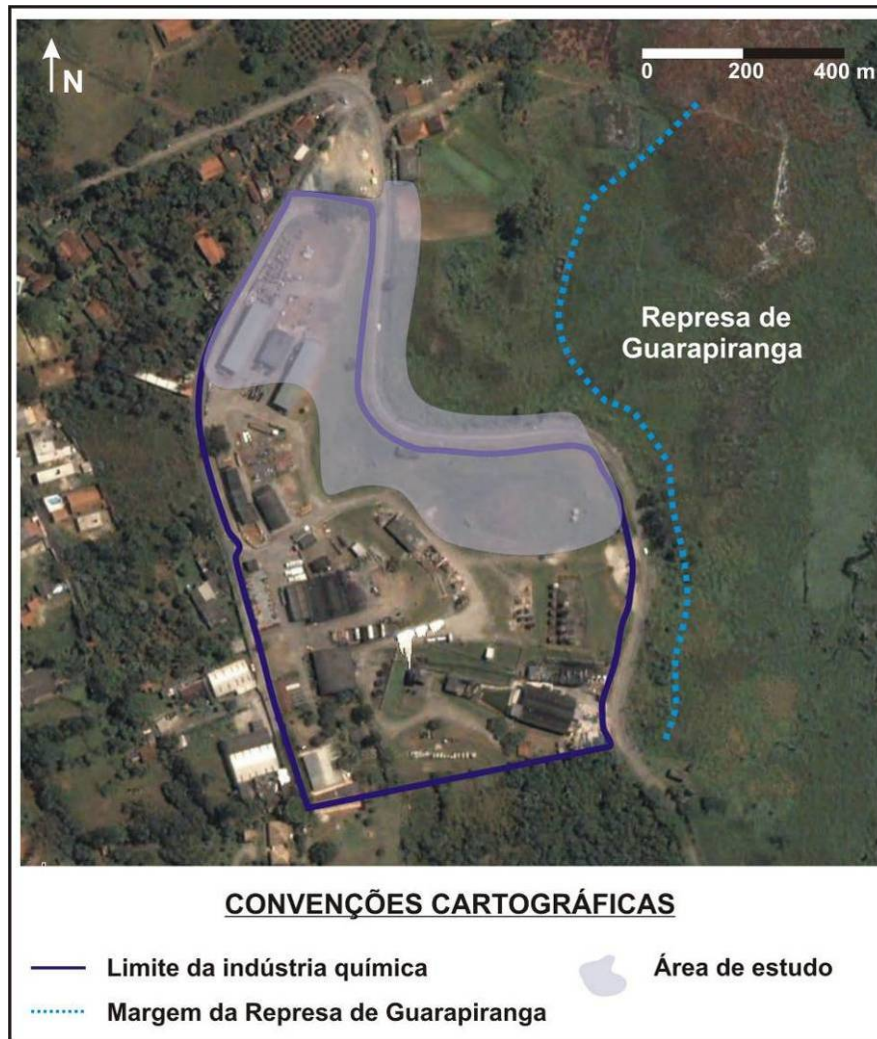


Figura 5.1 - Imagem mostrando a margem da represa, a área da indústria química e a área onde foram realizados os levantamentos eletromagnéticos.

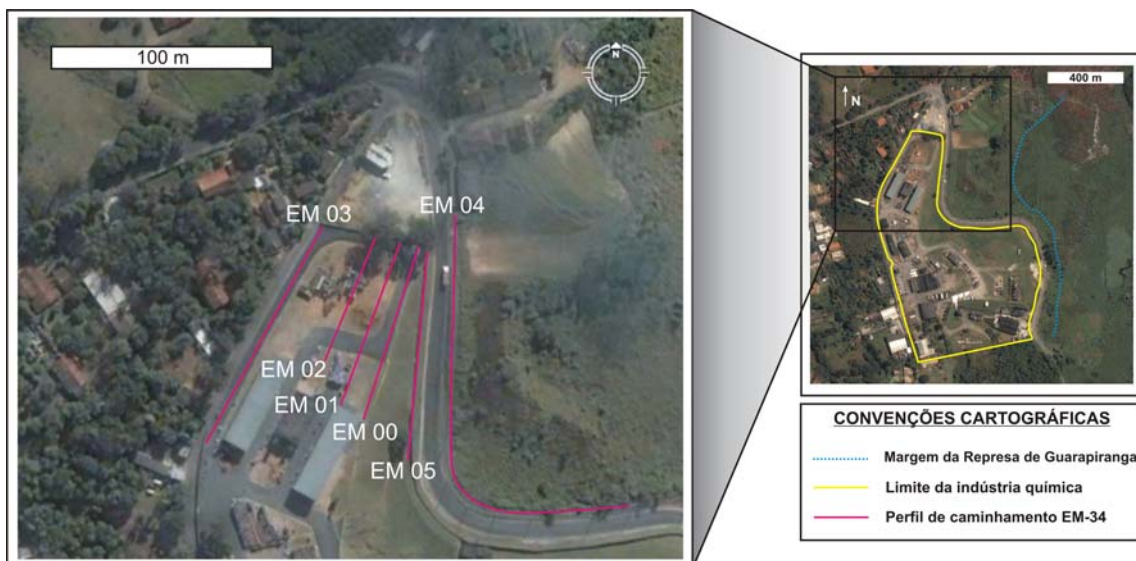


Figura 5.2 - Localização das linhas de caminhada eletromagnético EM 00 a EM 05, na porção norte da área. Nota-se que a linha EM 04 foi realizada fora da área da indústria química.

As linhas de caminhamento eletromagnético EM 06, EM 07, EM 08 foram realizadas à leste da área central da indústria (Figura 5.3), com sentido de caminhamento de oeste para leste.



Figura 5.3 - Localização das linhas de caminhamento eletromagnético EM 06 a EM 08, executadas na porção leste da área industrial.

Os dados foram coletados com o equipamento EM-34 com os cabos de 10 e 20 metros, investigando os níveis teóricos de 7,5, 15 e 30 metros de profundidade. Para uma melhor visualização dos perfis, estes foram plotados em pseudo-seções de condutividade aparente, utilizando-se o software *Surfer 6.0* (Golden Software, 1996).

As pseudo-seções das linhas de caminhamento eletromagnético serão ilustradas a seguir pelas Figuras 5.4 a 5.13. Deve-se salientar que foram utilizadas diferentes escalas de cores para a condutividade aparente, para que pudessem ser melhores destacadas e observadas as anomalias mais representativas em cada perfil.

A pseudo-seção da linha de caminhamento eletromagnético EM 00 (Figura 5.4), apresenta valores elevados (até 60 mS/m) de condutividade aparente localizados entre 30 e 70 metros, tanto em sua parte superficial, quanto na parte mais profunda. Isto sugere a presença de contaminação nesta área. Os valores elevados de condutividade aparente na parte profunda do perfil (abaixo da profundidade teórica de 20 metros) são sugestivos de contaminação na zona saturada. Valores moderados de condutividade aparente são vistos entre 70 e 135 metros e também entre 5 e 30 metros, enquanto que valores mais reduzidos são observados no início do perfil (até 10 metros) assim como em zonas dispersas entre 90 e 120 metros da linha de caminhamento.

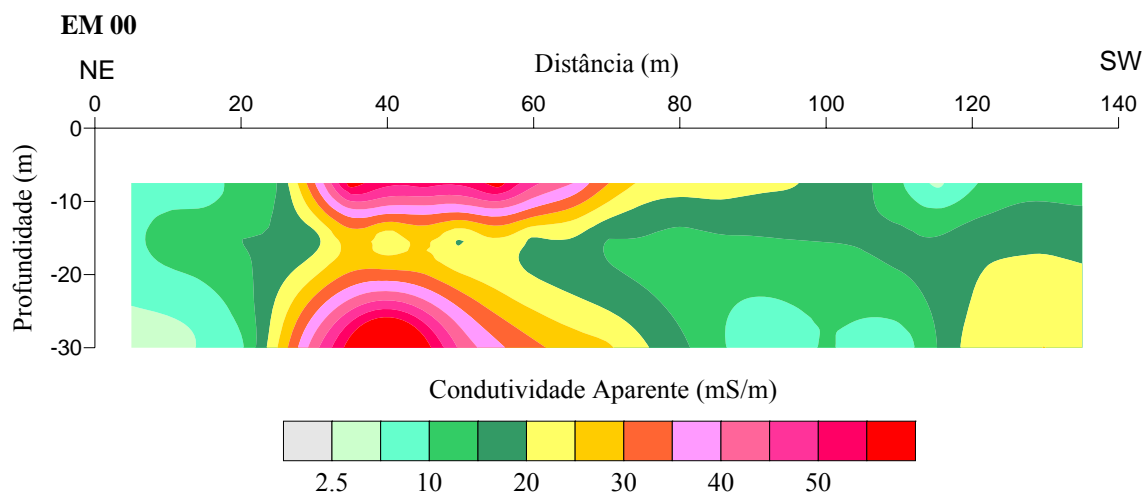


Figura 5.4 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 00.

A Figura 5.5 mostra a linha de caminhamento eletromagnético EM 01 que está localizada á oeste da linha de caminhamento EM 00. Sua pseudo-seção apresenta valores elevados de condutividade aparente (até 85 mS/m) localizados na porção mais central (20 a 90 metros). Tal verificação sugere a presença de contaminantes neste local. Valores moderados á reduzidos de condutividade aparente são observados nas porções iniciais (0 a 30 metros) e finais (a partir de 90 metros) da linha de caminhamento. Anomalias com valores negativos são vistas na parte mais profunda do perfil e podem ser explicadas por Maclean et.al. (1991). Segundo o autor, quando a bobina transmissora e a receptora estão do mesmo lado do condutor, H_p e H_s serão somados, e o campo resultante é maior do que o medido na ausência de um condutor, entretanto, quando eles estão em lados opostos, H_s se opõe a H_p , e o resultado é uma anomalia “negativa”.

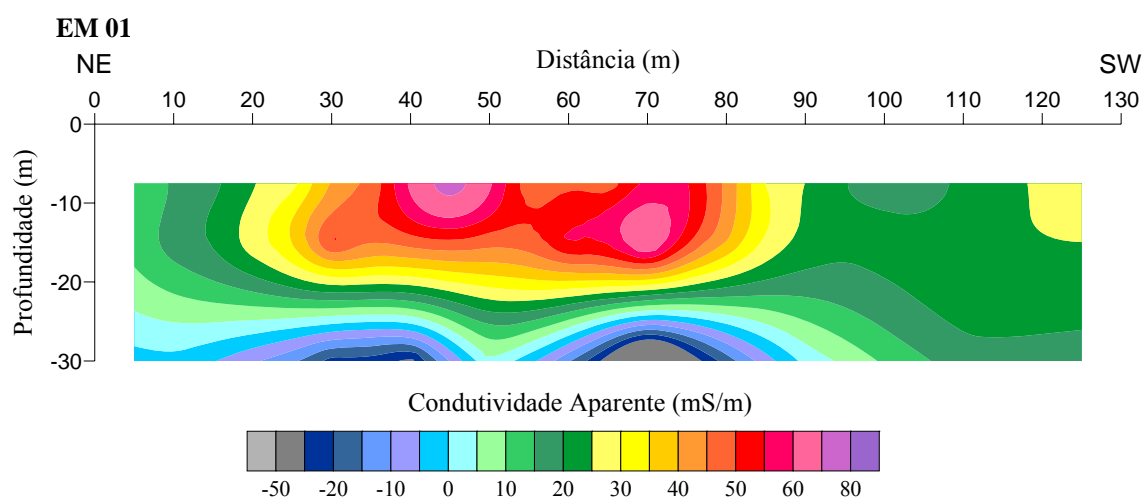


Figura 5.5 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 01.

A linha de caminhamento eletromagnético EM 02 (Figura 5.6) está localizada á oeste da linha de caminhamento EM 01. Na sua pseudo-seção observam-se valores moderados de

condutividade aparente (até 35 mS/m) localizados em sua porção inicial (0 a 20 metros) e final (a partir de 65 metros). Baixos valores de condutividade aparente são vistos entre 20 e 65 metros e ainda na porção central e mais profunda da linha de caminhada.

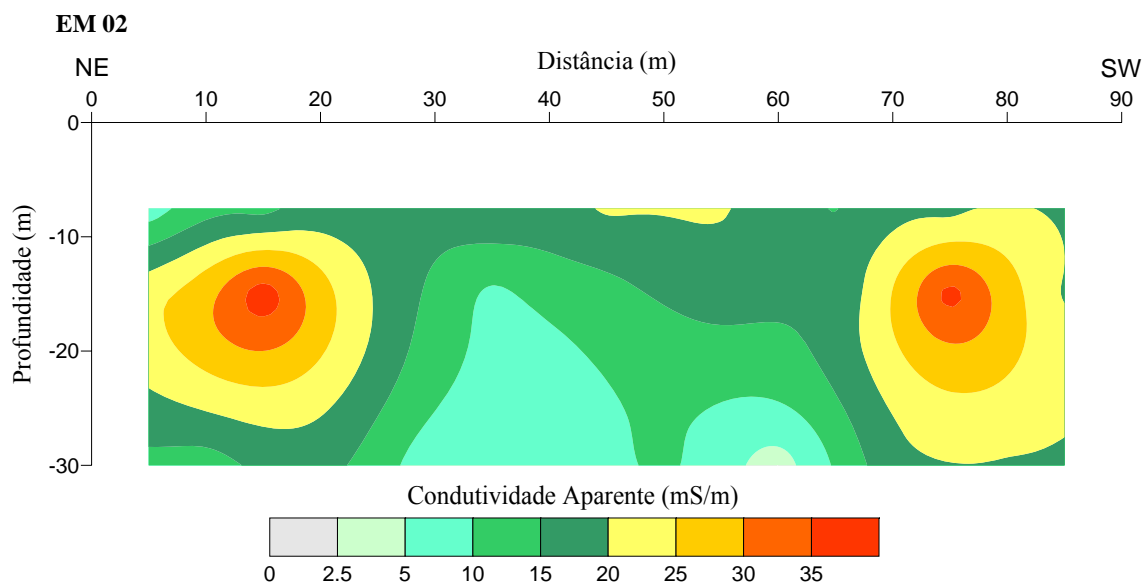


Figura 5.6 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 02.

A linha de caminhada eletromagnético EM 03 (Figura 5.7), está localizada á oeste da linha de caminhada EM 02. Sua pseudo-seção apresenta valores moderados de condutividade aparente (até 40 mS/m) localizados entre 10 e 40 metros e também em uma porção localizada entre 120 e 185 metros (na porção mais profunda do perfil). Valores mais reduzidos de condutividade aparente podem ser vistos na porção mais superficial ao longo de todo o perfil e também entre 50 e 70 metros.

Os valores de condutividade para essas duas linhas de ensaio não são claramente sugestivos de contaminação, pois são compatíveis com solo argiloso ou argilo-siltoso, como ocorre na área. Através dos mapas potenciométricos apresentados anteriormente nas Figuras 3.3 e 3.4, sabe-se que os sentidos do fluxo da água subterrânea são para leste e nordeste, de forma que também não é esperada contaminação profunda (na zona saturada) nessas linhas de ensaio.

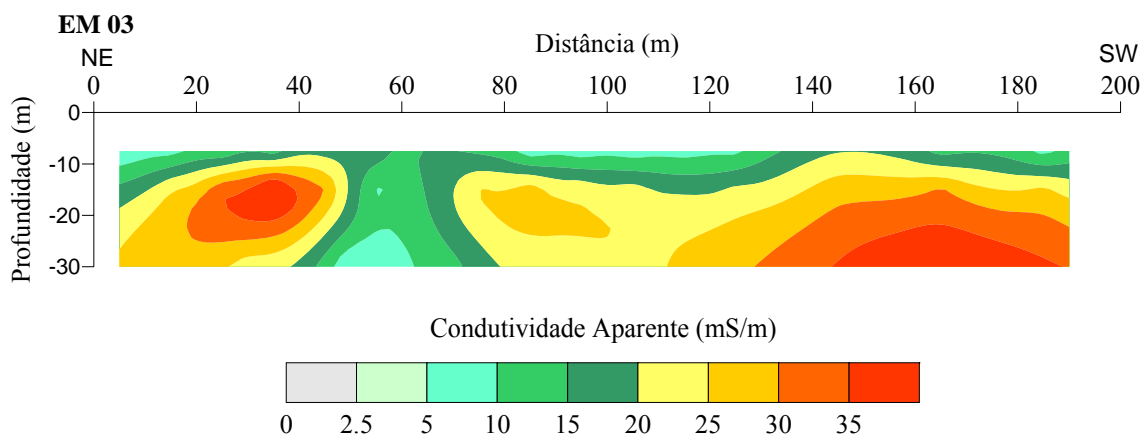


Figura 5.7 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 03.

A linha EM 04, foi realizada fora da área da indústria, à leste das linhas anteriormente citadas, próxima a barreira de poços. A linha de caminhamento eletromagnético realizada antes da barreira de poços entrar em operação foi denominada EM 4.1. A linha de caminhamento eletromagnético realizada com a barreira de poços em funcionamento foi denominada EM 4.2.

A pseudo-seção da linha de caminhamento eletromagnético EM 4.1 mostrada na Figura 5.8, apresenta valores elevados de condutividade aparente (até 140 mS/m) localizados na porção inicial (5 a 100 metros) e final (180 a 200 metros) da linha de caminhamento. Tal verificação sugere a presença de forte contaminação nesta área. Valores moderados de condutividade aparente podem ser vistos da porção mediana até a distância aproximada de 180 metros.

A pseudo-seção da linha de caminhamento eletromagnético EM 4.2 (Figura 5.9), apresenta valores elevados de condutividade aparente (até 1.000 mS/m) localizados em toda a extensão da linha de caminhamento (0 a 380 metros) indicando a presença de forte contaminação nesta área. Valores moderados de condutividade aparente podem ser vistos em porções concentradas entre 5 e 40 metros, 230 e 260 metros (nas suas porções mais superficiais), e também entre 80 e 180 metros e entre 340 e 360 metros.

Por esta área estar localizada a jusante, presume-se que ambas as linhas EM-4.1 e EM-4.2 terão maiores concentrações de contaminantes, uma vez que a pluma de contaminação está se deslocando no mesmo sentido do fluxo da água subterrânea, ou seja, para leste-nordeste. A linha de caminhamento eletromagnético EM 4.2 realizada com a barreira de poços em funcionamento apresenta valores de condutividade aparente ainda mais elevados. Isto pode significar que o bombeamento acelerou a migração da contaminação para a barreira de poços. O resultado deste bombeamento, somado ao fluxo natural da água subterrânea, que se desloca no sentido da barreira de poços, foi uma maior concentração de contaminação neste local.

Apresentação e Discussão dos Resultados

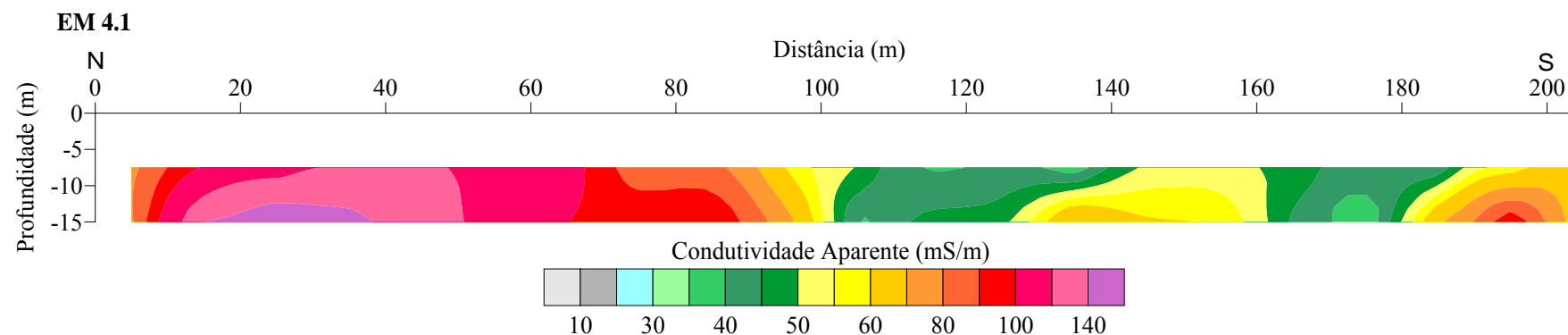


Figura 5.8 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 4.1.

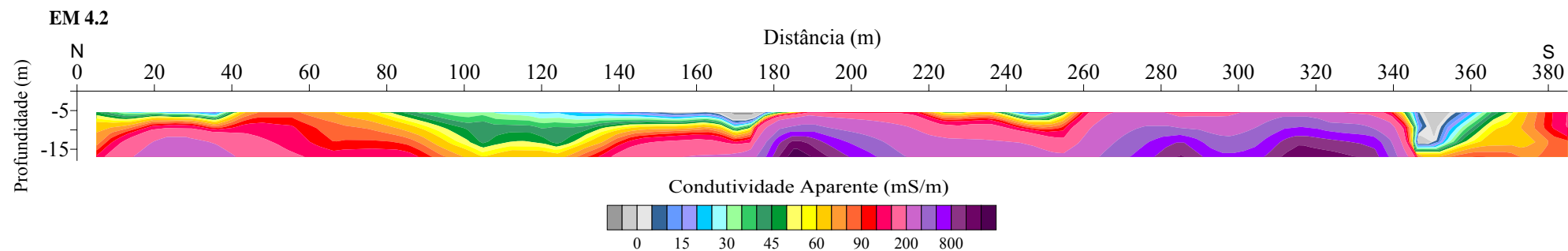


Figura 5.9 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 4.2.

A linha de caminhamento eletromagnético EM 05 visualizada na Figura 5.10, está localizada á leste da linha de caminhamento EM 00. Sua pseudo-seção apresenta valores elevados de condutividade (até 40 mS/m) entre 10 e 50 metros (principalmente em sua porção mais profunda), em 100 metros (na porção rasa e mais profunda) e entre as posições de 120 e 135 metros. Considerando que esta linha está à jusante do sentido do fluxo, essas zonas de condutividade moderada podem estar relacionadas a pluma de contaminação. Valores mais reduzidos de condutividade aparente podem ser vistos nas porções medianas da linha de caminhamento (40 a 120 metros) em todos os níveis de profundidade e em sua porção inicial (5 a 10 metros).

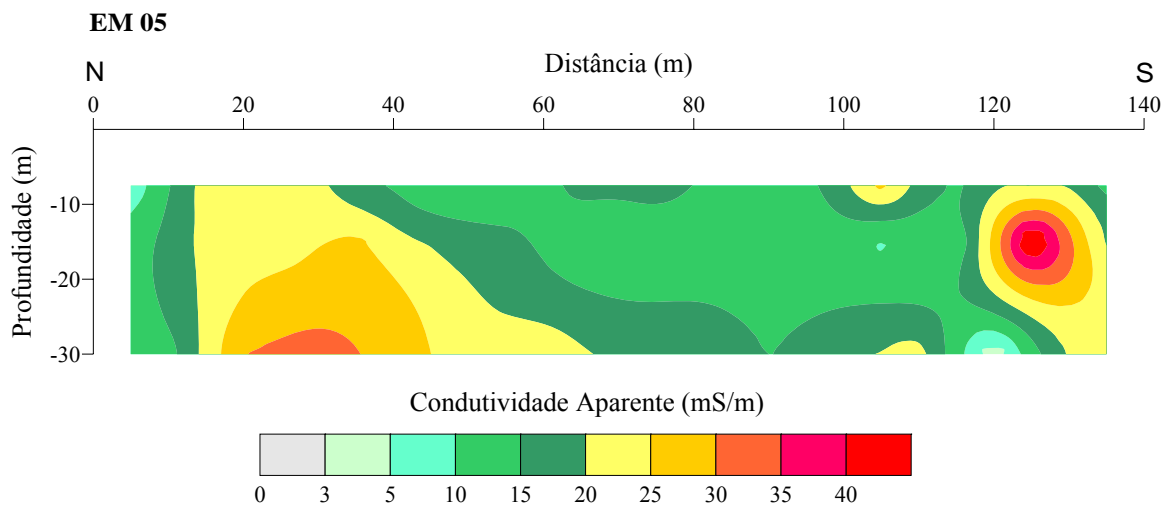


Figura 5.10 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 05.

As linhas de caminhamento eletromagnético EM 06, EM 07, EM 08 foram realizadas à leste da área central da indústria.

Na Figura 5.11 a pseudo-seção da linha de caminhamento eletromagnético EM 06, apresenta altos valores de condutividade aparente (até 60 mS/m) localizados entre as distâncias de 70 a 100 metros, sugestivos de contaminação nesta área. Na porção mediana da linha de caminhamento (50 e 70 metros) ocorre um trecho com valores de condutividade aparente moderados. Nas demais porções da linha de caminhamento, os valores de condutividade aparente são baixos.

Entre as distâncias de 20 e 40 metros ocorrem anomalias com condutividade aparente negativa que podem ser resultado de ruído produzido pela interação com uma casa de alta tensão localizada próxima a estes pontos.

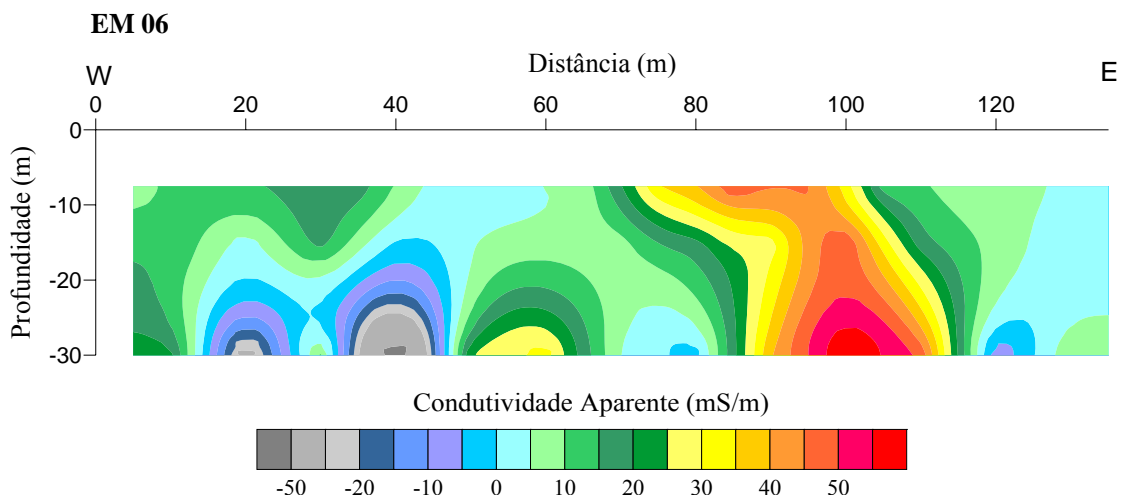


Figura 5.11 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 06.

A linha de caminhada eletromagnético EM 07 (Figura 5.12) está localizada á sul da linha de caminhada EM 06. Apresenta valores reduzidos de condutividade aparente (até 15 mS/m) em toda sua extensão, com a ocorrência de um trecho entre 20 e 35 metros (em sua porção mais profunda) onde ocorrem valores um pouco mais altos de condutividade aparente. Este perfil não é indicativo de contaminação no local. Anomalias com condutividade aparente negativa entre 15 e 70 metros também podem estar relacionadas com a casa de alta tensão e caixa d'água.

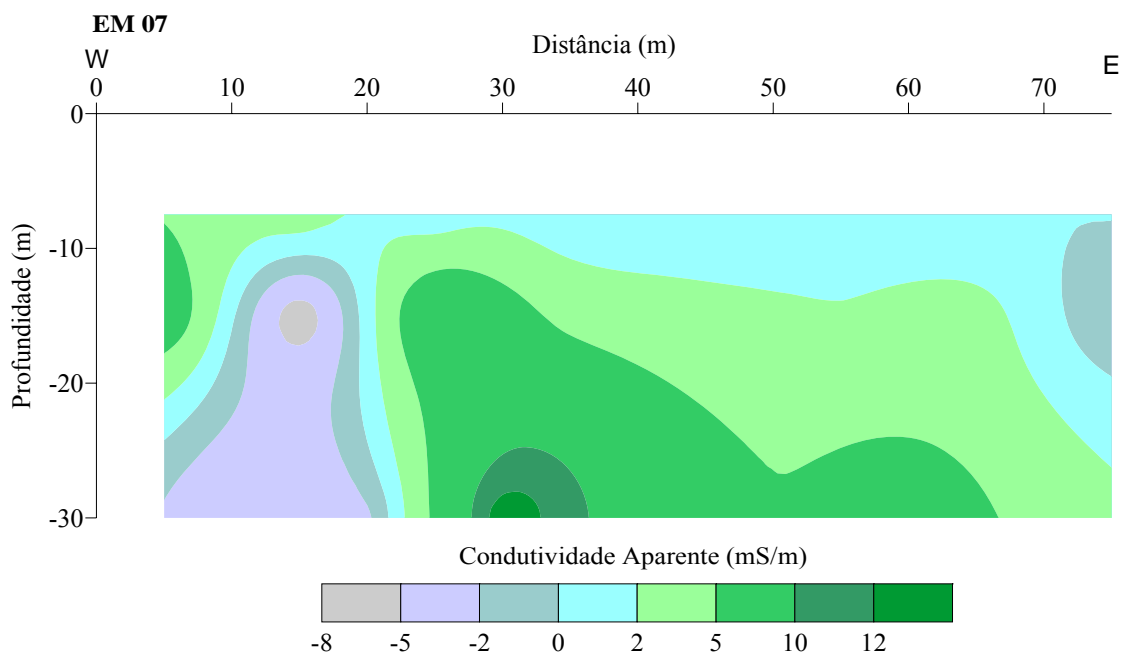


Figura 5.12 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 07.

A linha de caminhada eletromagnético EM 08 (Figura 5.13) apresenta condutividade aparente elevada (até 50 mS/m) na porção mediana mais profunda (20 até os 40 metros), o que pode sugerir a presença de contaminação neste local. Valores mais reduzidos de condutividade aparente

podem ser vistos em sua porção inicial (5 a 10 metros) e em todas as demais porções da linha de caminhamento. Novamente ocorre zona com condutividade aparente negativa que pode ter relação com construções próximas.

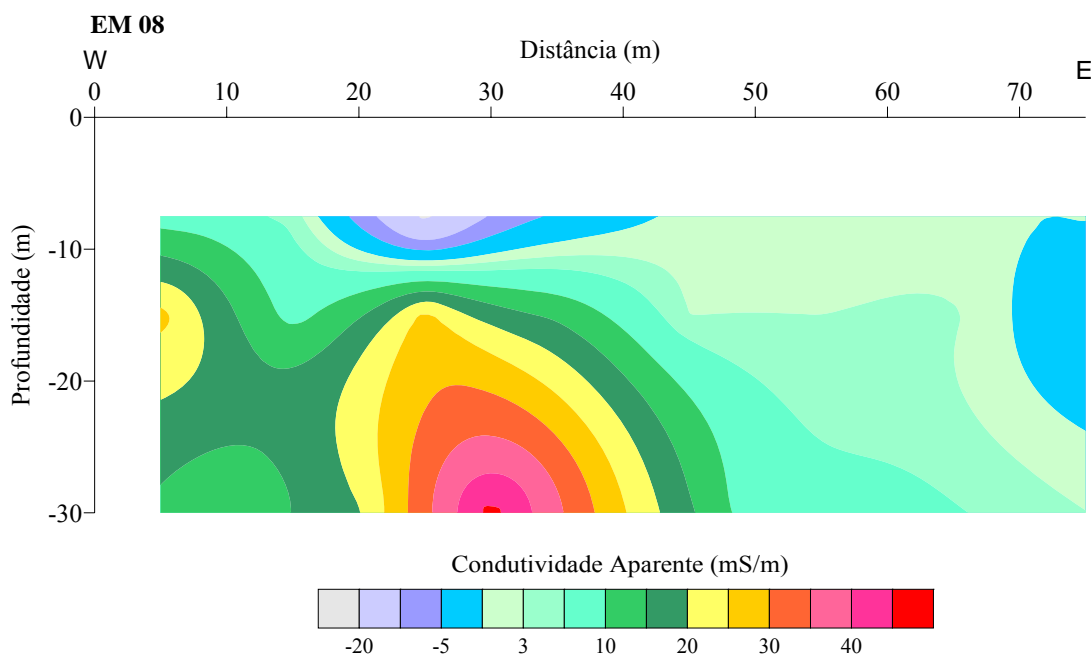


Figura 5.13 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 08.

Após a análise de todas as pseudo-seções foram elaborados mapas de caracterização geral da área a partir dos dados de todas as linhas nas diferentes profundidades teóricas (7,5; 15 e 30 metros). O objetivo da elaboração destes mapas é delimitar com maior precisão as posições dos resíduos e da pluma de contaminação existentes na área. Para os mapas de caracterização eletromagnética elaborados a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05 também foram utilizados dados topográficos, já que ocorre uma variação topográfica de aproximadamente 6 metros entre algumas linhas do mapa. Os demais mapas montados a partir dos dados das linhas EM 06 a EM 08 possuem topografia plana.

Deve-se atentar ao fato de que os mapas de caracterização eletromagnética não estão localizados conforme suas coordenadas UTM's, mas sim, por distâncias reais arbitrárias. Outro item que deve ser observado é de que nem todas as linhas possuem o mesmo tamanho e o mesmo espaçamento entre uma e outra. Este fato ocorreu principalmente com os mapas confeccionados a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, devido ao desnível muito acentuado em uma parte da área e a presença de áreas construídas (galpões industriais), como pode ser observado na Figura 5.14.

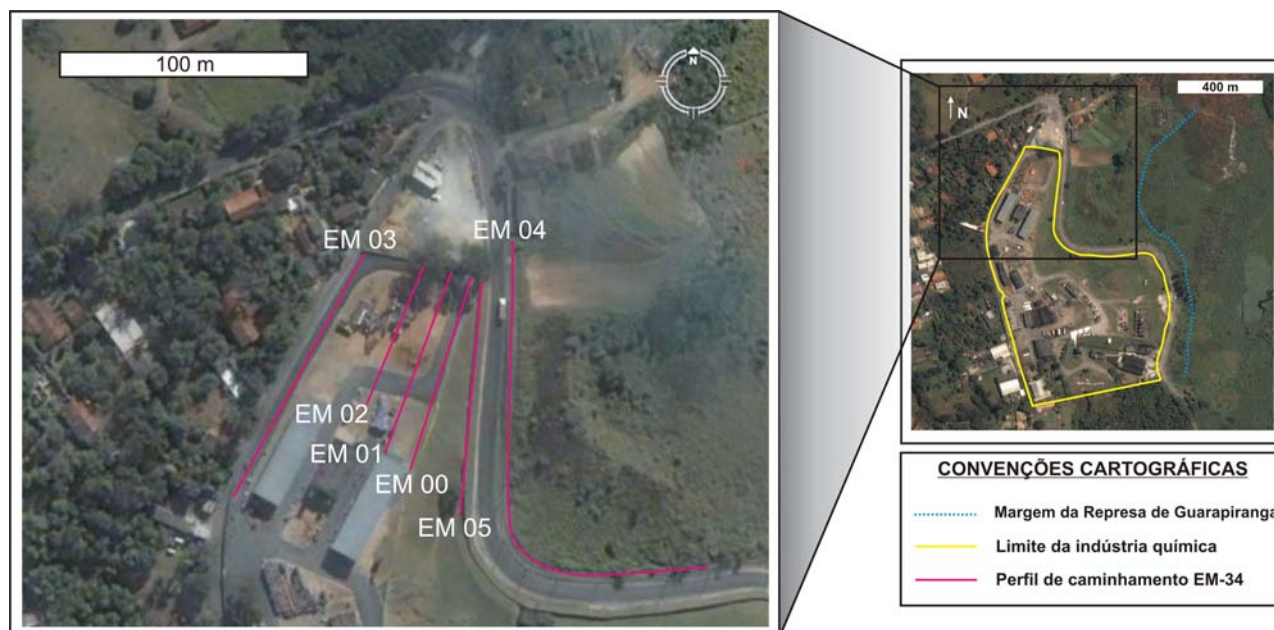


Figura 5.14 - Localização das linhas de caminhamento eletromagnético EM 00 a EM 05, na porção norte da área. Notam-se as áreas construídas no interior da indústria, que impediram a continuidade de execução das linhas.

Os mapas de caracterização eletromagnética serão ilustrados a seguir pelas Figuras 5.15 a 5.23.

O mapa abaixo (Figura 5.15) mostra a caracterização eletromagnética da área, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 7,5 metros.

A Figura 5.16 mostra o mapa de caracterização eletromagnética da área, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 7,5 metros, considerando a topografia da área.

Verificou-se que na profundidade de 7,5 metros, os dados apresentam os maiores valores de condutividade aparente (até 150 mS/m) em uma região fortemente delimitada, na parte nordeste da área, anomalia esta interpretada como uma área afetada pela presença de contaminantes. Também são visualizadas outras duas áreas anômalas, uma também na parte nordeste da área com condutividade aparente de até 90 mS/m e outra no extremo sudeste, de tamanho reduzido e com condutividade aparente de até 70 mS/m. Estas também podem ser interpretadas como áreas afetadas pela presença de contaminantes. A topografia, associada ao sentido do fluxo da água subterrânea (leste-nordeste), indica claramente que a contaminação está concentrada a jusante da área e que ela está se deslocando no mesmo sentido do fluxo. Por sua vez, o padrão da contaminação observado no mapa 5.16 corrobora com o que foi observado nos perfis individuais de cada linha de caminhamento eletromagnético. Assume-se então que as porções mais a leste e nordeste da área têm as maiores concentração de contaminantes.

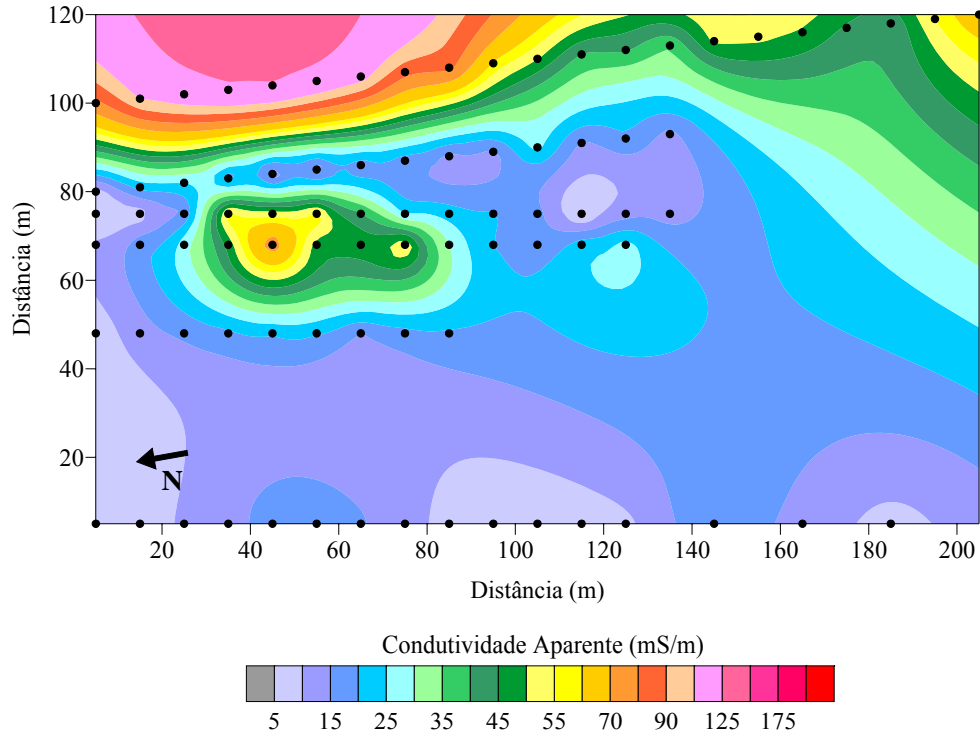


Figura 6.15 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 7,5 metros.

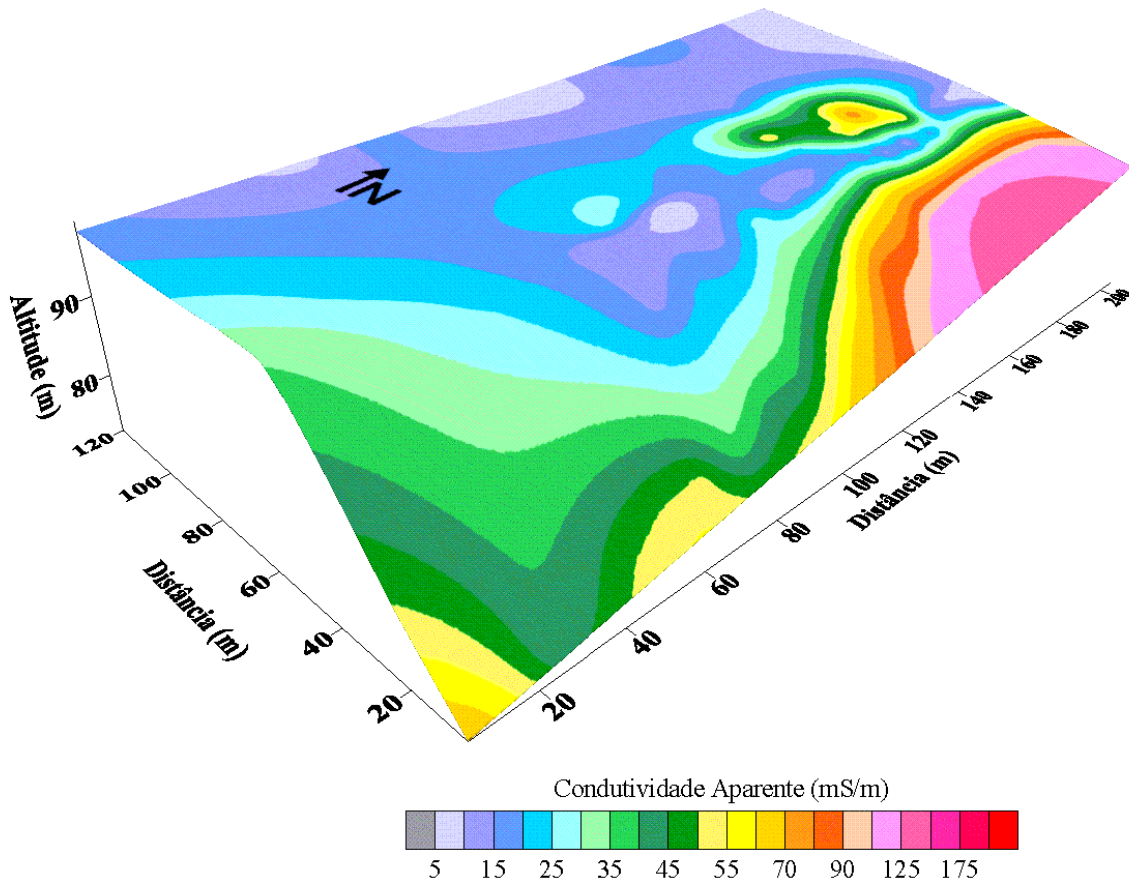


Figura 5.16 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 7,5 metros, considerando a topografia da área.

O mapa da Figura 5.17 mostra a caracterização eletromagnética da área, a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 15 metros. A Figura 6.18 mostra a caracterização eletromagnética da área para essa profundidade considerando a topografia.

Nestas figuras podemos verificar que na profundidade de 15 metros, os maiores valores de condutividade aparente (até 150 mS/m) se concentram em uma região fortemente delimitada, na parte nordeste da área - anomalia interpretada como área com presença de contaminantes. Esta área é a mesma que foi visualizada no mapa da profundidade de 7,5 metros. Também são visualizadas outras três áreas anômalas, uma também na parte nordeste da área com condutividade aparente de até 70 mS/m e outras duas na parte sudeste com condutividade aparente de até 100 mS/m (que podem corresponder as mesmas áreas visualizadas no mapa da profundidade de 7,5 metros, porém abrangendo um tamanho maior). Todas também podem ser interpretadas como áreas afetadas pela presença de contaminantes.

Assim como na Figura 5.16 (profundidade 7,5 metros), a topografia, associada ao sentido do fluxo da água subterrânea (leste-nordeste), indica claramente que a contaminação está concentrada a jusante da área e que ela está se deslocando no mesmo sentido do fluxo. Por sua vez, o padrão da contaminação observado na Figura 5.18 corrobora com o que foi observado nos perfis individuais de cada linha de caminhamento eletromagnético.

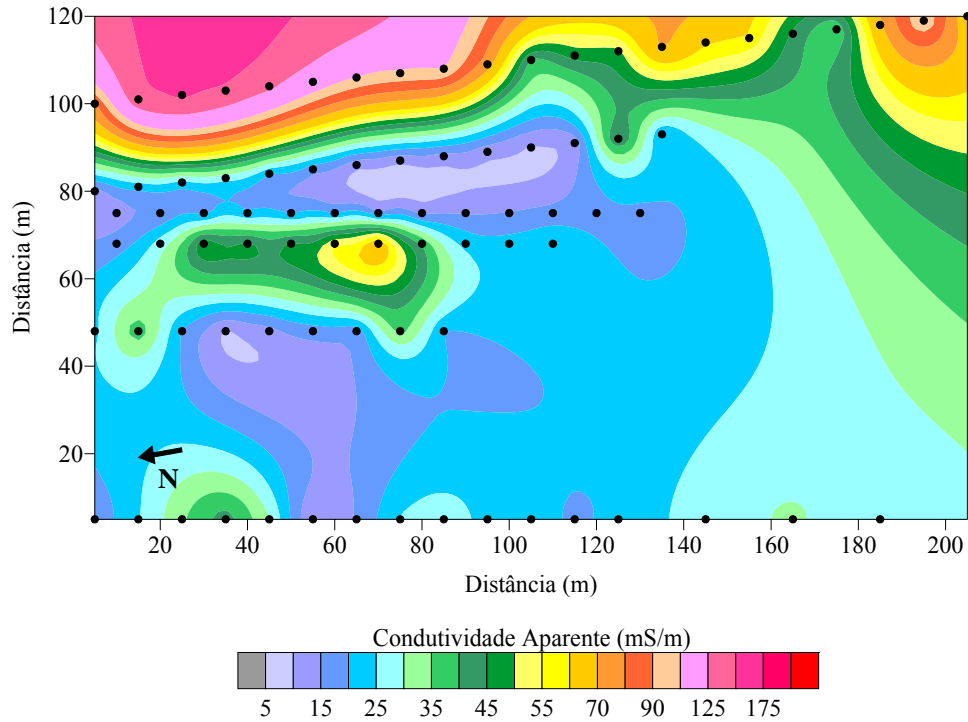


Figura 5.17 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 15 metros.

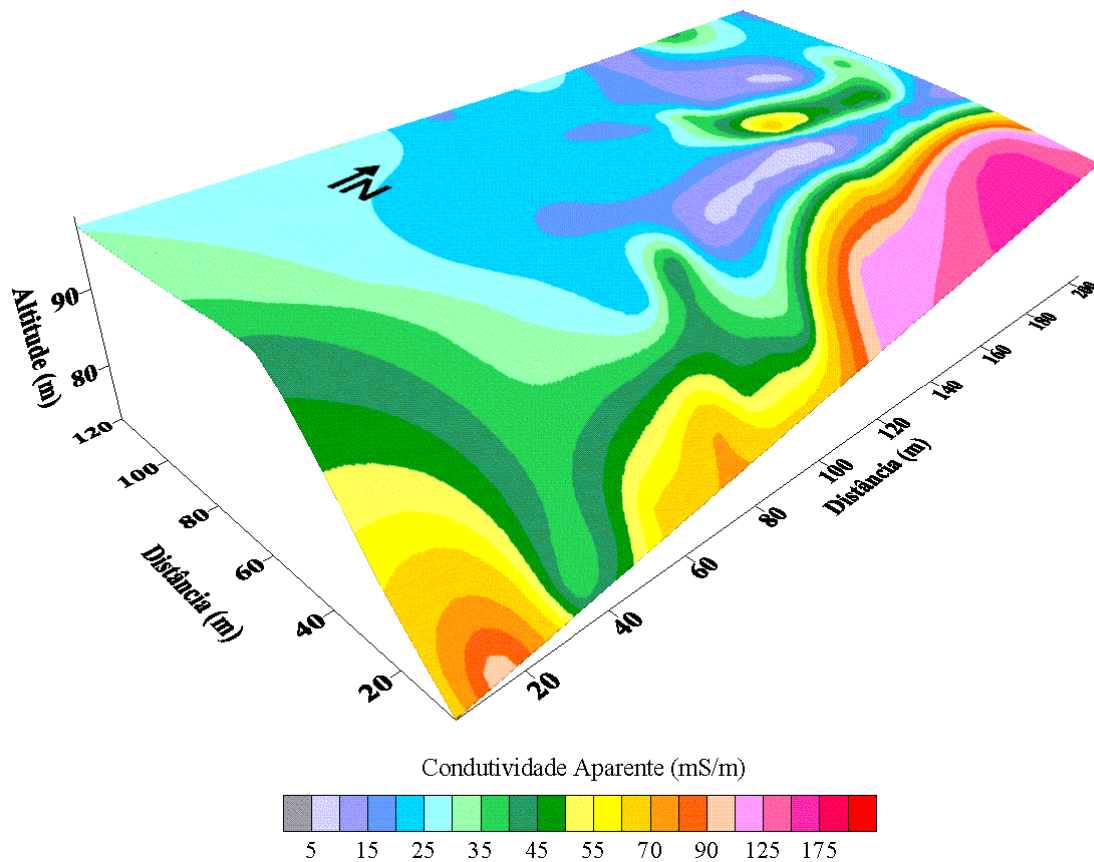


Figura 5.18 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 15 metros, considerando a topografia da área.

O mapa da Figura 5.19 mostra a caracterização, em termos de condutividade aparente, da profundidade de 30 metros. Na Figura 5.20 é apresentado esse levando em consideração a topografia da área. Este mapa está diferente dos demais, pois na linha EM 4.1 não foram coletados dados na profundidade teórica de 30 metros.

Verificou-se que na profundidade de 30 metros os maiores valores de condutividade aparente (até 65 mS/m) se concentram na parte nordeste da área. Assim, esta anomalia pode ser interpretada como uma área contaminada. Esta área anômala representa outra área que até então não tinha sido visualizada nos mapas de 7,5 e 15 metros de profundidade. Também pôde ser visualizada outra área anômala, na parte sudoeste do mapa, com condutividade aparente de até 40 mS/m que também pode ser interpretada como área afetada pela presença de contaminação.

A partir dos mapas apresentados foi possível detalhar de forma mais precisa as posições das áreas de abrangência da contaminação na porção norte da indústria química. Estas englobam as áreas a nordeste e a sudeste (com maior expressão da contaminação visualizada apenas nos mapas de 7,5 e 15 metros de profundidade), uma pequena área a norte e outra área a sudoeste (visualizada apenas no mapa de 30 metros de profundidade).

O mesmo procedimento (apresentação de mapas de diferentes profundidades teóricas) foi utilizado para a outra área (onde ocorreu a contaminação do solo devido a um acidente).

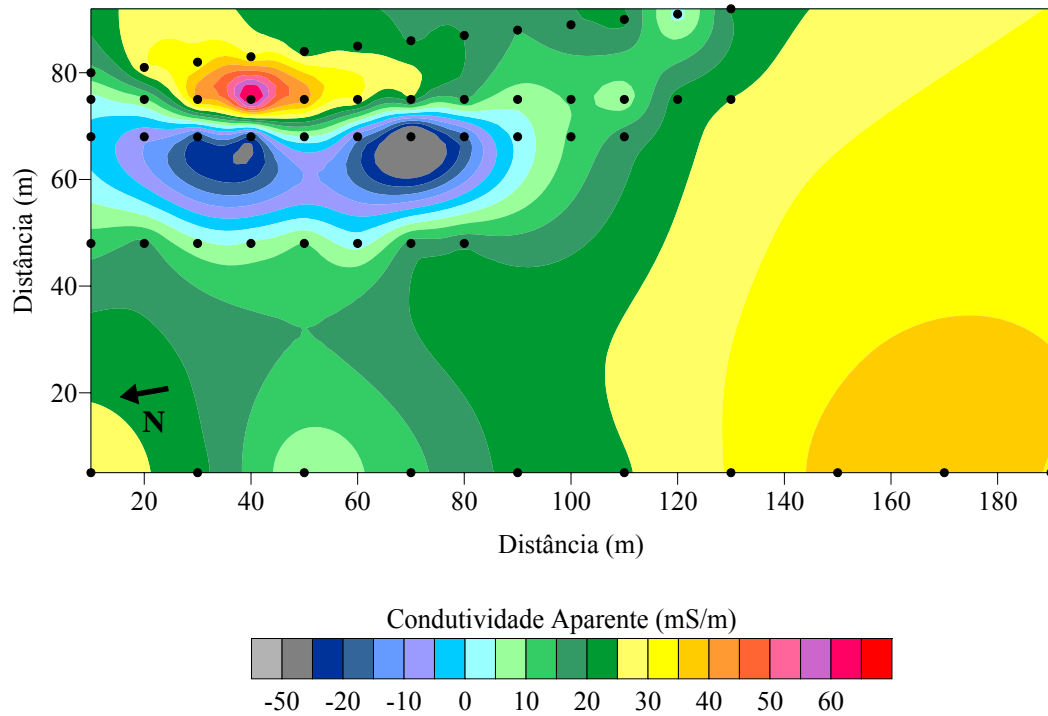


Figura 5.19 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 30 metros.

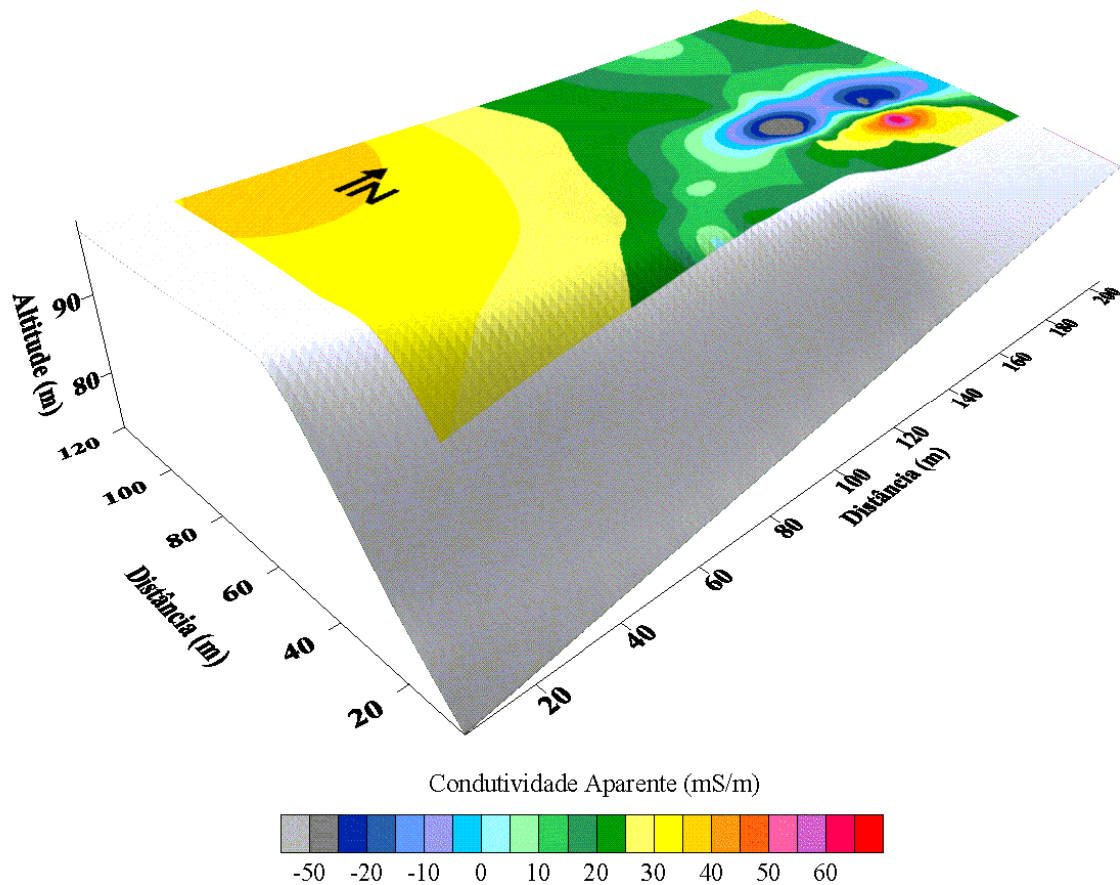


Figura 5.20 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 00 a EM 05, na profundidade de 30 metros, considerando a topografia da área.

Na Figura 5.21 é apresentado o mapa de profundidade teórica de 7,5 metros, elaborado a partir dos dados das linhas EM 06 a EM 08.

Neste mapa, observa-se que na profundidade de 7,5 metros, os locais que apresentam os valores de condutividade aparente de até 35 mS/m estão localizados em uma região delimitada, na parte norte da área. Assim, esta anomalia pode ser interpretada como uma área afetada pela presença de contaminantes, porém, menos intensa que as anteriores analisadas.

Na distância de aproximadamente 45 metros ocorre uma anomalia com condutividade aparente negativa que podem ser resultado de ruído produzido pela interação com uma casa de alta tensão, localizada próxima a este local.

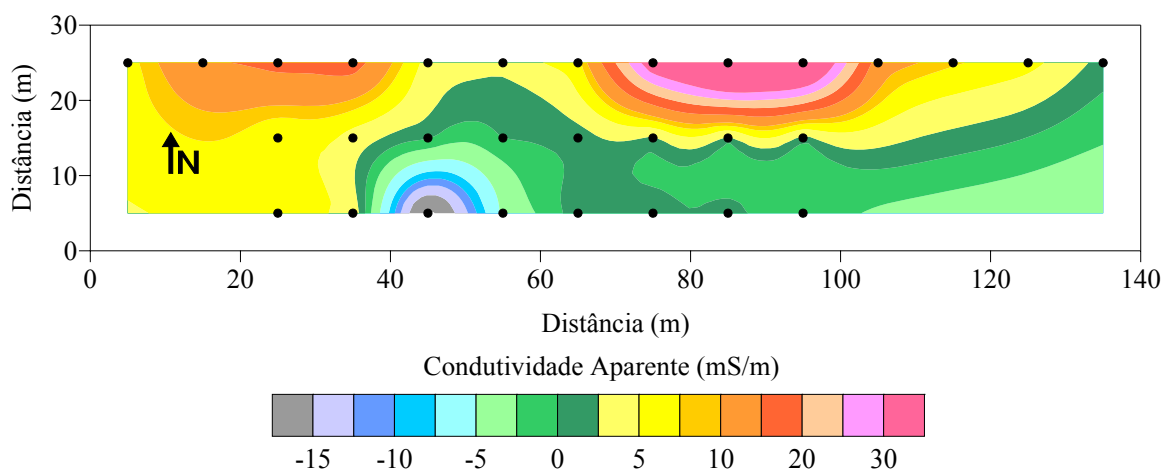


Figura 5.21 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 06 a EM 08, na profundidade de 7,5 metros .

O mapa da Figura 5.22 mostra a variação de condutividade aparente na profundidade de 15 metros. Nesse mapa observa-se que os pontos que apresentam os maiores valores de condutividade aparente (até 80 mS/m) estão localizados em uma região delimitada, na parte norte da área, coincidente com a área visualizada no mapa da profundidade de 7,5 metros. Com isso, esta anomalia pode ser interpretada como uma área afetada pela presença de contaminantes. Na posição norte do mapa, em 35 e 120 metros de distância ocorrem anomalias com condutividade aparente negativa que podem ser resultado de ruído produzido pela interação com uma casa de alta tensão e uma caixa d'água, respectivamente, localizadas próximas a estes pontos.

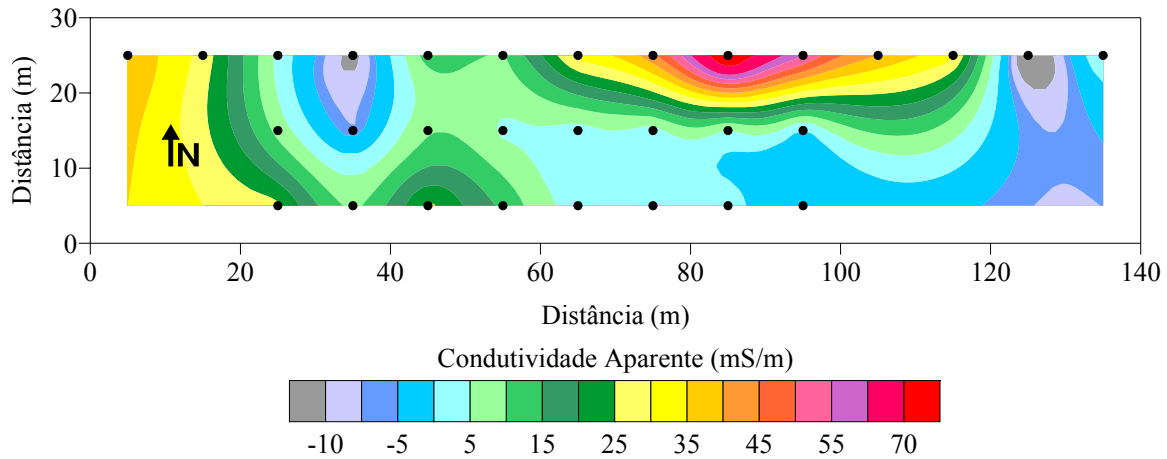


Figura 5.22 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 06 a EM 08, na profundidade de 15 metros.

O mapa da Figura 5.23 mostra as variações de condutividade aparente na profundidade de 30 metros. Nessa profundidade observa-se que os pontos que apresentam os maiores valores de condutividade aparente (até 65 mS/m) estão localizados em uma região delimitada, na parte norte da área, coincidente com aquelas áreas observadas nos mapas das profundidades de 7,5 e 15 metros, o que caracteriza a área atingida pelos contaminantes. Na posição norte do mapa, em 20, 40 e 120 metros de distância ocorrem anomalias com condutividade aparente negativa que podem ser resultado de ruído produzido pela interação com uma casa de alta tensão localizada próxima aos dois primeiros pontos e uma caixa d'água, localizada próxima ao terceiro.

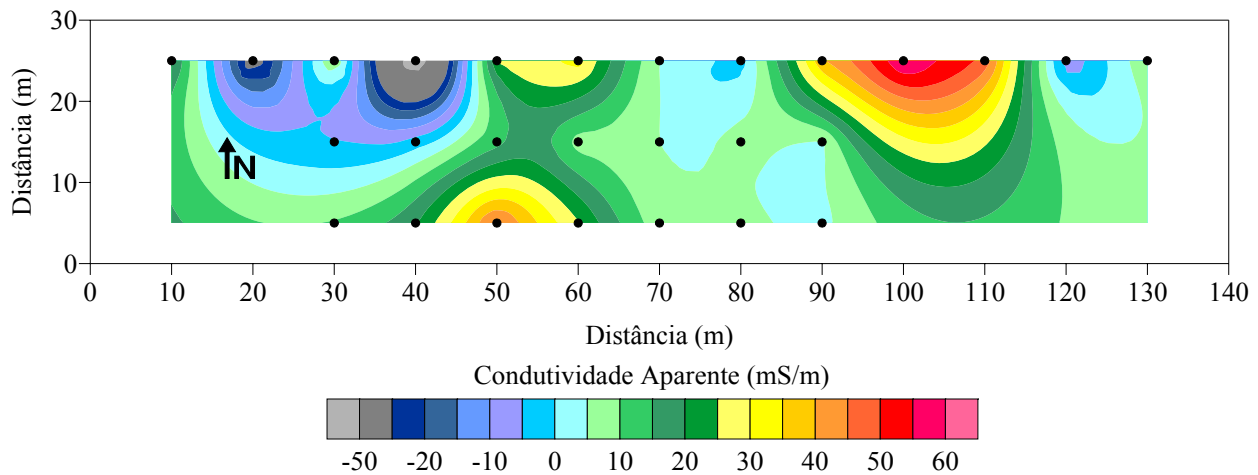


Figura 5.23 - Mapa de caracterização eletromagnética, elaborado a partir dos dados das linhas EM 06 a EM 08, na profundidade de 30 metros.

5.2 Dados Elétricos

O levantamento geofísico para a coleta dos dados elétricos (perfis paralelos de caminhamento elétrico e polarização induzida) foi conduzido nas áreas onde foram constatados os valores mais elevados de condutividade aparente, mostrados através dos perfis de caminhamento eletromagnéticos executados anteriormente. Os levantamentos foram então realizados nas mesmas áreas e em posição idêntica aos perfis de caminhamento eletromagnético, como pode ser identificado na Figura 5.24.

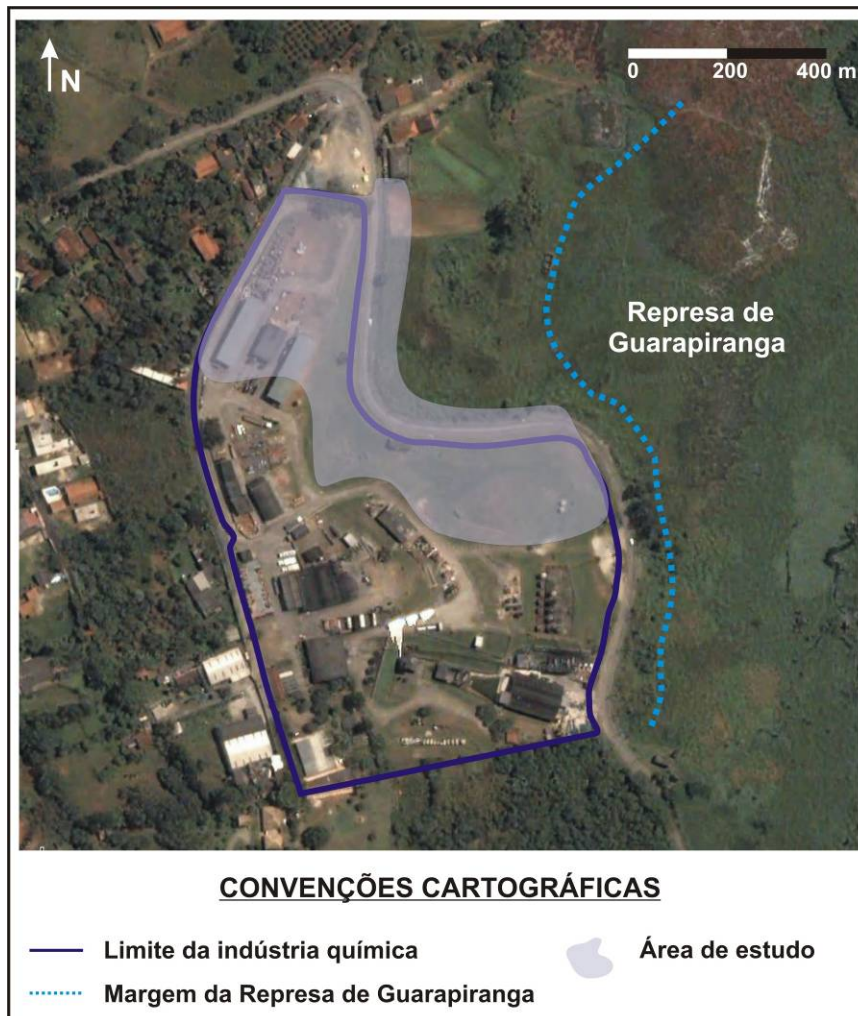


Figura 5.24 - Imagem mostrando a margem da represa, área da indústria química e a área onde foram realizados os levantamentos elétricos.

Foram executadas 5 (cinco) linhas de caminhamentos elétricos (CE 01 a CE 05) localizadas exatamente sobre as linhas de caminhamentos eletromagnéticos que mostraram os maiores valores

de condutividade aparente, para que os resultados de ambas as técnicas possam ser complementados.

Os dados foram coletados com o resistivímetro francês de marca *Iris*, modelo *Syscal R2*, que consiste de um conversor de voltagem e um sistema de emissão e recepção montados em uma única unidade, investigando cinco níveis teóricos. Utilizou-se o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 5 metros entre os dipolos e entre cada linha (CE 01, CE 02, CE 03 e CE 04) e, com espaçamento de 10 metros entre os dipolos e entre cada linha (CE 05).

As linhas de caminhamento elétrico CE 01 e CE 02 foram realizadas na porção mais ao norte da indústria, como pode ser visualizado na Figura 5.25. O nível d'água na área está em torno de 15 metros de profundidade, de modo que as feições que serão mostradas nas Figuras 5.26 e 5.27 se encontram na zona não saturada. O sentido de caminhamento das linhas CE 01 e CE 02 é de nordeste para sudoeste.

A linha CE 05, foi realizada fora da área da indústria, à oeste das linhas anteriormente citadas, próxima a barreira de poços (Figura 5.25). O nível d'água na área está em torno de 6 metros de profundidade no início da seção chegando a 2 metros no final da seção, de modo que as feições mostradas na Figura 5.28 se encontram parte na zona não saturada, parte na zona saturada.

Vale citar que a linha CE 05 foi feita com a barreira de poços em pleno funcionamento. O sentido de caminhamento da linha CE 05 é de norte para sul.

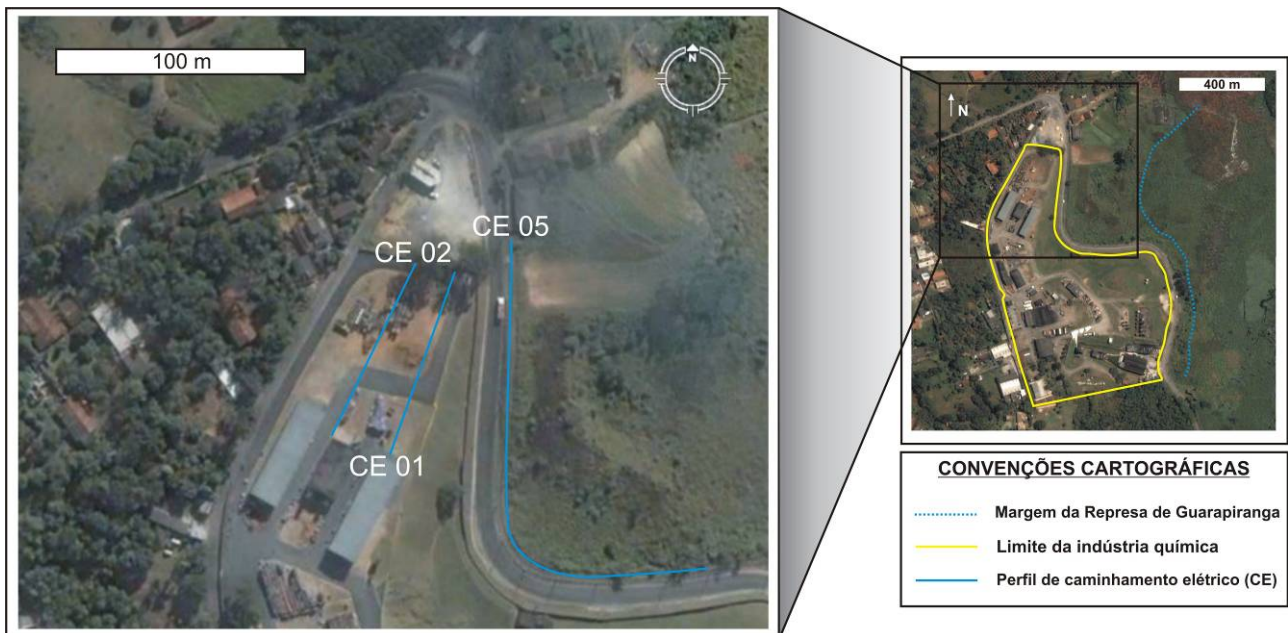


Figura 5.25 - Localização das linhas de caminhamento elétrico CE 01, CE 02 e CE 05, realizadas na porção norte da área. Nota-se que a linha CE 05 foi realizada fora da área da indústria química.

As seções de resistividade elétrica e cargabilidade serão ilustradas a seguir pelas Figuras 5.26 a 5.31. No ANEXO I são mostrados os modelos de inversão dos dados de resistividade e cargabilidade aparentes.

A seção de resistividade elétrica da linha de caminhamento elétrico CE 01 (Figura 5.26), apresenta baixos valores de resistividade elétrica ($< 26.1 \Omega.m$) em sua parte mais superficial, entre 10 e 15 metros e entre 25 e 50 metros de distância. Os valores observados entre 25 e 50 metros pode corresponder a uma mesma zona contaminada visualizada anteriormente no perfil EM 01 com valores elevados de condutividade aparente. Valores com resistividade mais alta ($> 34.5 \Omega.m$) são observados na parte mais profunda da seção entre as distâncias de 20 e 35 metros e também entre as distâncias de 50 e 57 metros.

A seção de cargabilidade da linha de caminhamento elétrico CE 01 (Figura 5.26), apresenta uma porção com cargabilidade alta ($> 40.8 \text{ msec}$) localizada entre as distâncias de 30 e 37 metros. As demais porções do perfil não apresentaram feições de interesse quanto à possível pluma de contaminação.

Baixos valores de resistividade ($< 25 \Omega.m$) sugerem contaminação do meio, porém não é possível correlacionar a contaminação com os altos valores da seção de cargabilidade. Esta anomalia de alta cargabilidade pode indicar algum tipo de material metálico em subsuperfície.

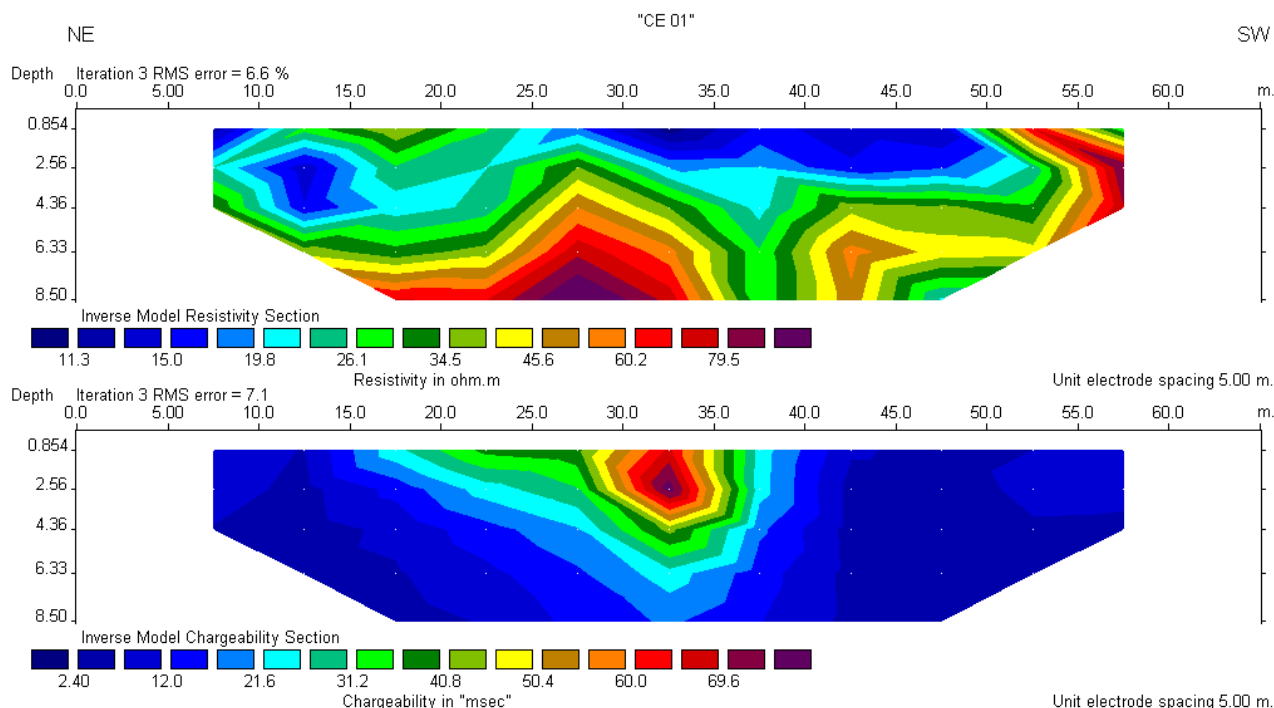


Figura 5.26 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha CE 01 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.

Na seção de resistividade elétrica da linha de caminhamento elétrico CE 02 (Figura 5.27), são observados baixos valores de resistividade elétrica ($< 27.2 \Omega.m$) principalmente entre as distâncias entre 45 e 50 metros, entre 30 e 42 metros. Entre 50 e 57 metros predominam valores de resistividade elétrica mais altos ($> 57.2 \Omega.m$).

A seção de cargabilidade da linha de caminhamento elétrico CE 02 (Figura 5.27), apresenta uma porção com baixos valores de cargabilidade ($> 1.97 \text{ msec}$) entre as distâncias de 50 e 57 metros. Cargabilidades ainda mais baixas ($< 1.00 \text{ msec}$) podem ser observados nas demais porções da seção, principalmente entre 35 e 40 metros.

Neste caso, baixos valores de resistividade ($< 27 \Omega.m$) associados aos baixos valores de cargabilidade ($< 2 \text{ msec}$) observados na seção, sugerem contaminação do meio.

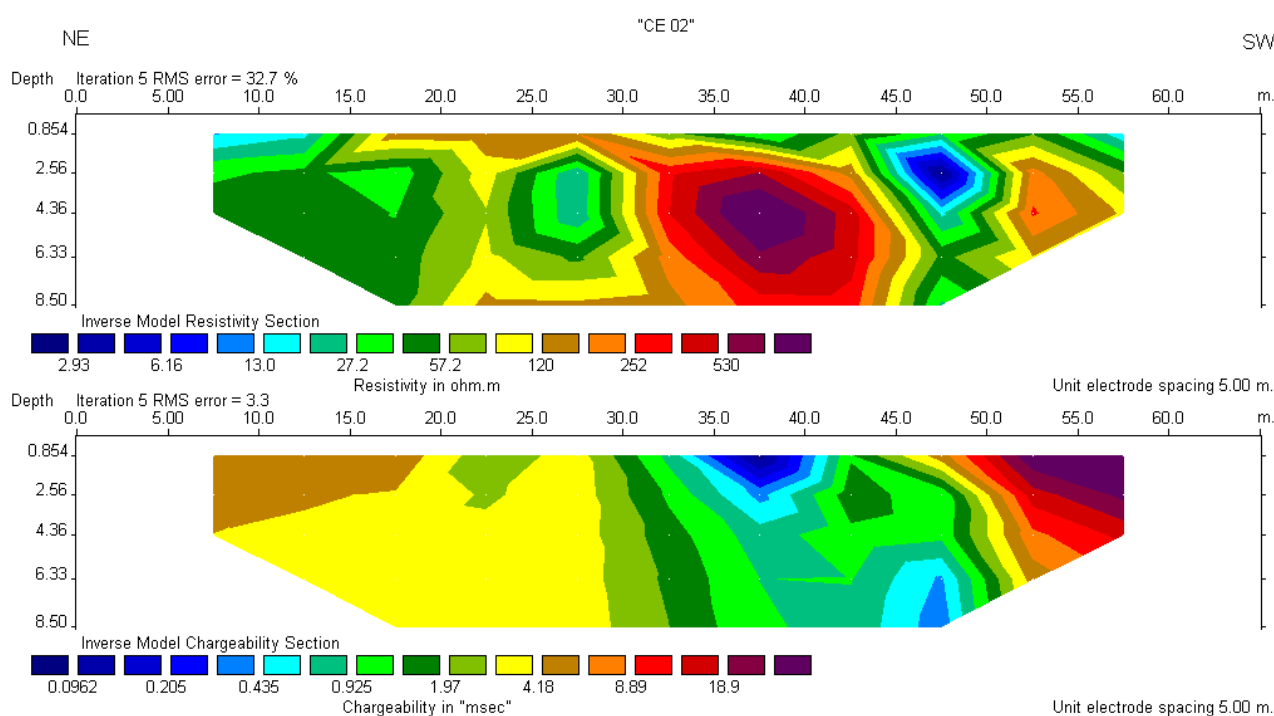


Figura 5.27 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha CE 02 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.

As anomalias de resistividade e cargabilidade vistas nas seções CE 01 e CE 02 podem ser interpretadas como produto de grande quantidade de metal encontrada na área. Assim, sugere-se que as anomalias de baixa resistividade e alta cargabilidade podem ser resultado da presença de materiais polarizáveis (metais) na área, e as anomalias de alta resistividade e baixa cargabilidade podem ser geradas pela presença do contaminante bruto (sedimento impregnado por tinta pura, tipicamente resistiva).

A seção de resistividade elétrica da linha de caminhamento elétrico CE 05 (Figura 5.28), apresenta três zonas distintas de resistividade elétrica, uma com valores mais baixos ($< 65.4 \Omega.m$) de resistividade (do início da seção até 90 metros de distância), outra também com valores mais reduzidos, entre 165 e 180 metros de distância, e uma terceira porção com valores elevados ($> 168 \Omega.m$) de resistividade (de 90 até 160 metros). Observa-se uma forte correlação desta seção com as linhas EM 4.1 e EM 4.2, as quais mostram uma mudança do padrão de condutividade aparente exatamente em 90 metros. As linhas EM 4.1 e EM 4.2 iniciam com uma condutividade aparente alta e passam a ter, em 90 metros, uma condutividade aparente mais baixa, corroborando com os dados visualizados na seção CE 05.

A seção de cargabilidade da linha de caminhamento elétrico CE 05 não pôde ser considerada neste estudo, pois os dados obtidos foram muito ruidosos.

Os altos valores de resistividade são interpretados como sendo material natural (solo residual e/ou rocha metamórfica). Os baixos valores de resistividade indicam contaminação do solo e das águas subterrâneas, uma vez o nível d'água está em cerca de 6 metros de profundidade nesse local.

Os resultados que sugerem contaminação na área já eram esperados como resultado da migração da contaminação, devido ao sentido do fluxo da água subterrânea estar se deslocando para essa área.

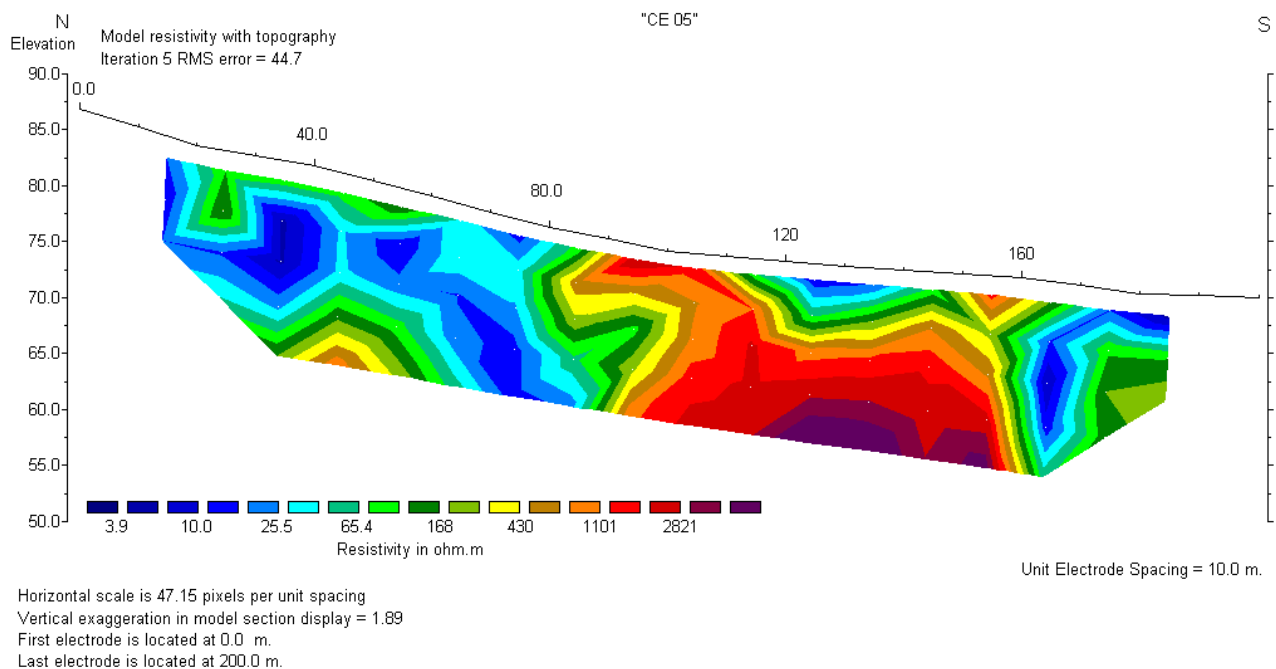


Figura 5.28 – Seção de resistividade elétrica para a linha CE 05 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.

As linhas de caminhamento eletromagnético CE 03 e CE 04 foram realizadas a leste da área central da indústria (Figura 5.29), com sentido de caminhamento de oeste para leste. Por estarem

localizadas na mesma área e próximas uma da outra, foi utilizada uma mesma escala para os valores de resistividade e outra para os valores de cargabilidade (para ambas as seções).

O nível d'água na área está em torno de 9 metros de profundidade, de modo que as feições mostradas nas figuras 5.30 e 5.31 se encontram na zona não saturada.

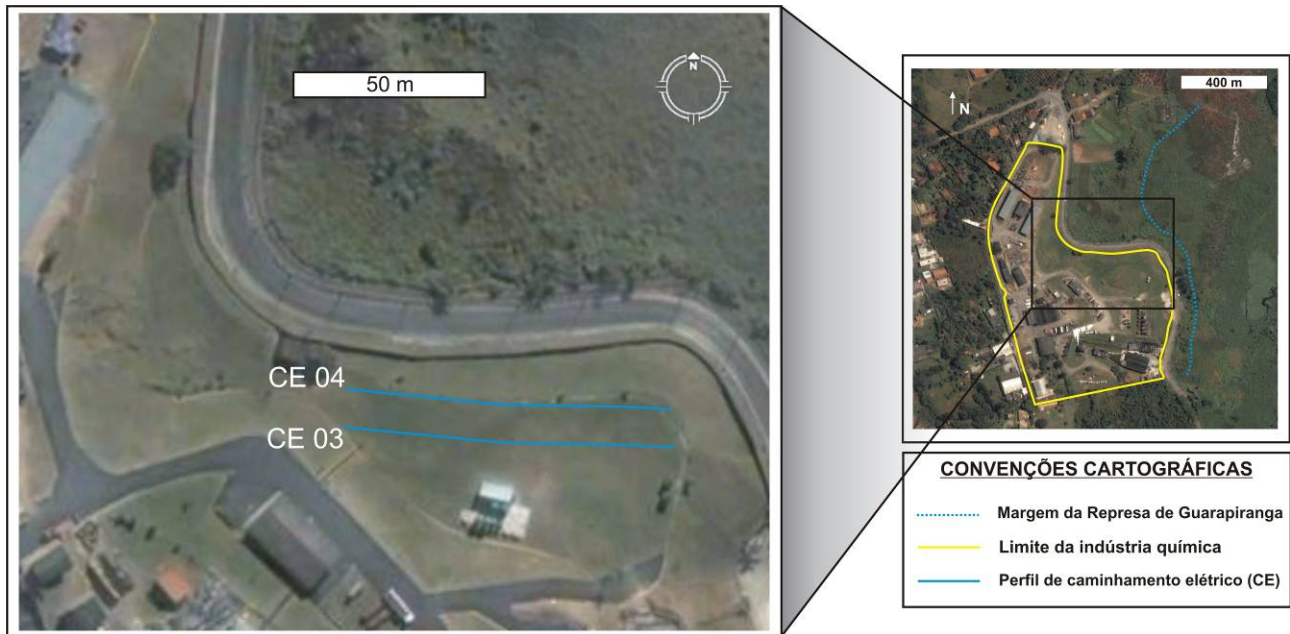


Figura 5.29 - Localização das linhas de caminhamento elétrico CE 03 a CE 04, realizadas na porção leste da área.

Na seção de resistividade elétrica da linha de caminhamento elétrico CE 03 (Figura 5.30), observa-se duas feições principais: baixa resistividade elétrica ($< 130 \Omega.m$) desde 15 até os 33 metros e também em sua parte mais profunda; e alta resistividade ($> 688 \Omega.m$) dos 33 metros de distância até o término da seção.

Na seção de cargabilidade da linha de caminhamento elétrico CE 03 (Figura 5.30), observa-se também duas feições principais: baixos valores de cargabilidade ($< 4.0 \text{ msec}$) entre as distâncias de 10 e 35 metros; e altos valores de cargabilidade ($> 12.9 \text{ msec}$) nas demais porções da seção.

A seção de resistividade elétrica da linha de caminhamento elétrico CE 04 (Figura 5.31), apresenta baixa resistividade elétrica ($< 130 \Omega.m$) em sua porção mais superficial, abrangendo também sua parte mais profunda desde o início da seção até os 35 metros. Alta resistividade ($> 688 \Omega.m$) é vista desde os 35 metros (da intermediária à profunda), e também no final do perfil (70 metros).

Apresentação e Discussão dos Resultados

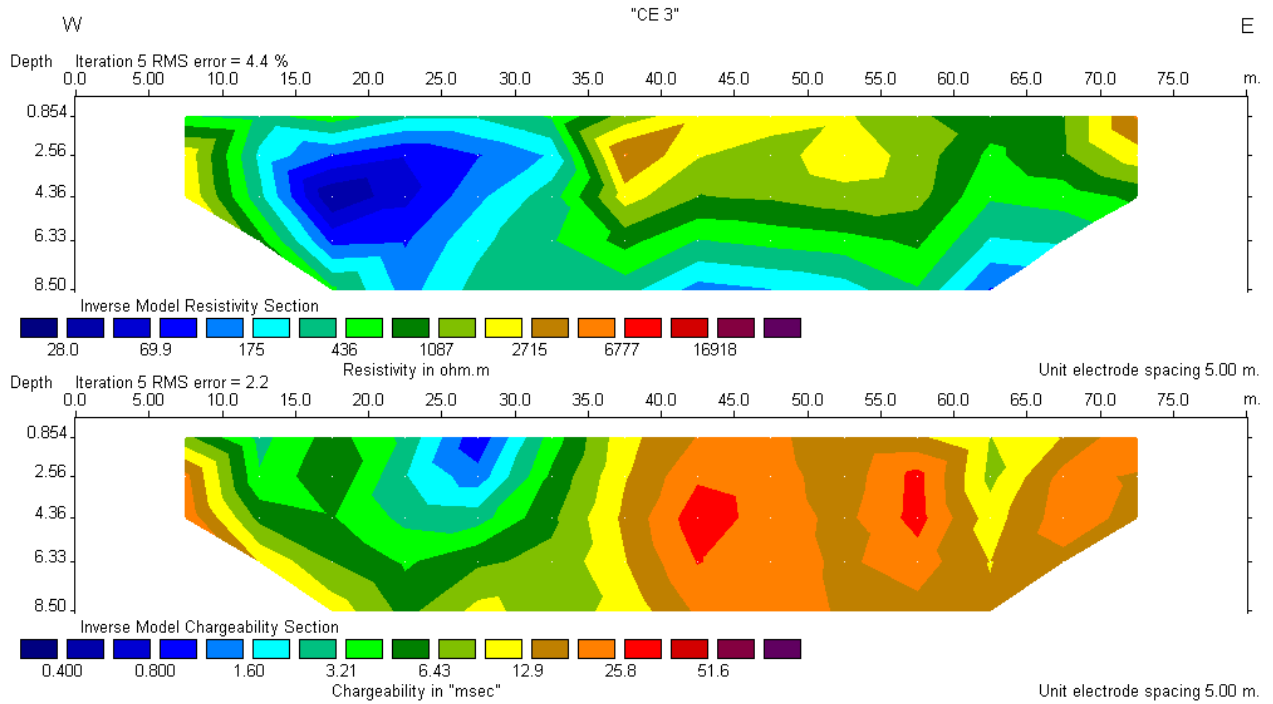


Figura 5.30 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha CE 03 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.

A seção de cargabilidade da linha de caminhamento elétrico CE 04 (Figura 5.31), apresenta uma porção com baixos valores de cargabilidade (< 4.0 msec) entre as distâncias de 15 e 35 metros. Altos valores de cargabilidade (> 12.9 msec) são observados nas demais porções da seção.

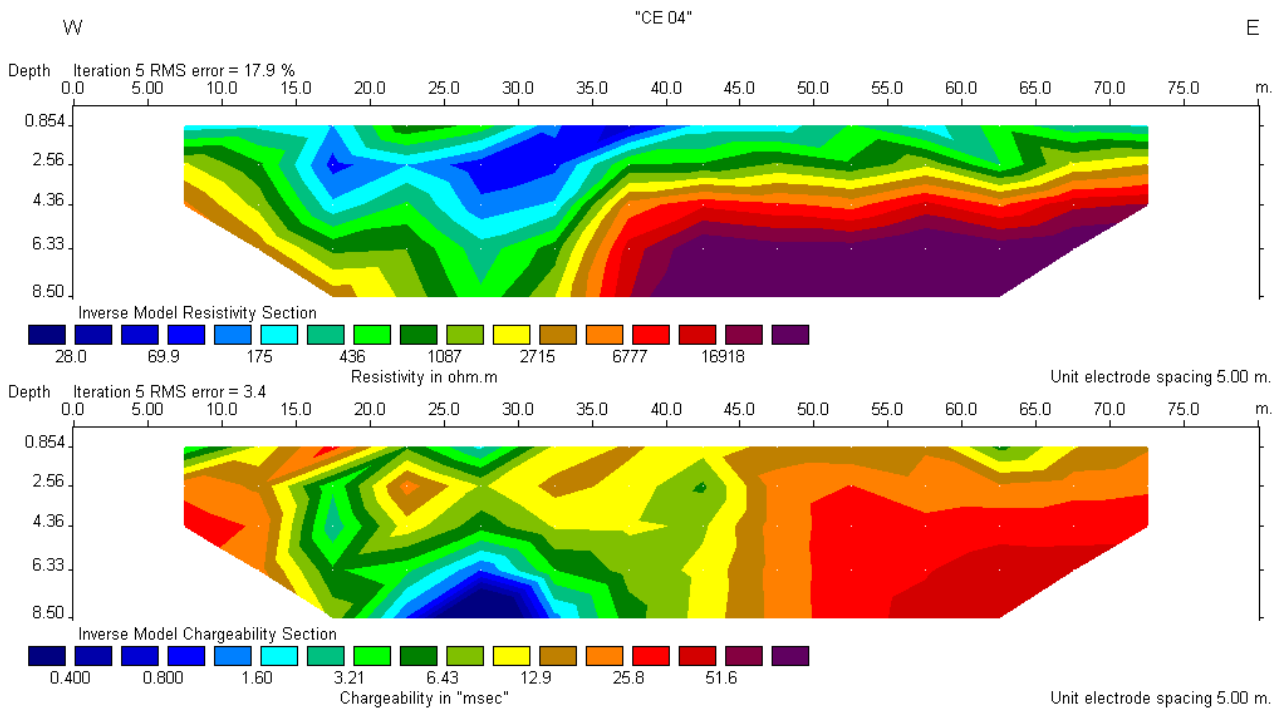


Figura 5.31 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha CE 04 adquirida com o arranjo Dipolo-Dipolo.

A mesma feição da linha CE 03, isto é, baixas resistividades e cargabilidades até aproximadamente 35 metros e altas resistividades e cargabilidades de 35 metros até o final da seção, é observada na linha CE 04. Porém, nesta os valores de resistividades e cargabilidade são maiores do que naquela.

Nessas duas linhas (CE 03 e CE 04) podem ser visualizadas zonas de resistividade mais baixa (30 a 130 $\Omega.m$) associadas a baixos valores de cargabilidade (0 a 4 msec) que sugerem contaminação do meio. Os valores de resistividade e cargabilidade acima desses limites são interpretados como produtos de material natural (solo residual de rocha metamórfica não saturado). Nessas linhas os valores das anomalias de resistividade estão um pouco acima dos observados para as linhas da porção mais ao norte da indústria. Isso reflete as características de cada local: na parte mais ao norte é esperada uma maior concentração de contaminantes, pois ali foram armazenados tambores contendo resíduos de solventes e outros materiais em áreas não impermeabilizadas, constituindo um pequeno depósito de resíduos; na outra área, ocorreu um episódio de contaminação pontual relacionado a um acidente, por isso espera-se uma menor quantidade de contaminantes.

Dessa forma, com os ensaios de resistividade e polarização induzida as áreas com solo contaminado foram melhor detalhadas, o que balizou o programa de coleta de amostras de solo para análise.

5.3 Dados Bacteriológicos

Através da observação dos dados de resistividade elétrica e cargabilidade, foram selecionados os locais para a coleta das amostras de solo e posterior realização das análises bacteriológicas. Os furos de sondagem ficaram então concentrados nas regiões que mostraram as principais anomalias de resistividade e cargabilidade. Os resultados destas análises servirão para correlacionar uma possível biodegradação em regiões com alterações significativas nas medidas de resistividade e cargabilidade.

Em cada um dos 5 (cinco) perfis realizados foi executada uma sondagem. Os furos atingiram a profundidade de 4 metros e foram coletadas amostras a cada metro perfurado. A amostra SD-01 foi assim denominada por ter sido coletada sobre o caminhamento elétrico CE 01, a amostra SD-02 por ter sido coletada sobre o caminhamento CE 02 e assim sucessivamente, com exceção da SD-06 que também foi coletada sobre o caminhamento CE 01. Os boletins com os resultados das análises podem ser visualizados no ANEXO II.

Sobre o caminhamento elétrico CE 01 foram realizadas 2 (duas) sondagens: SD-01 (na distância de 33 metros) e SD-06 (na distância de 20 metros), como pode ser visualizado na Figura

5.32. Os resultados analíticos da amostra SD-01 e SD-06 são mostrados na Tabela 5.1. Ambas as amostras em todas as profundidades não apresentaram unidades formadoras de colônias (UFC).

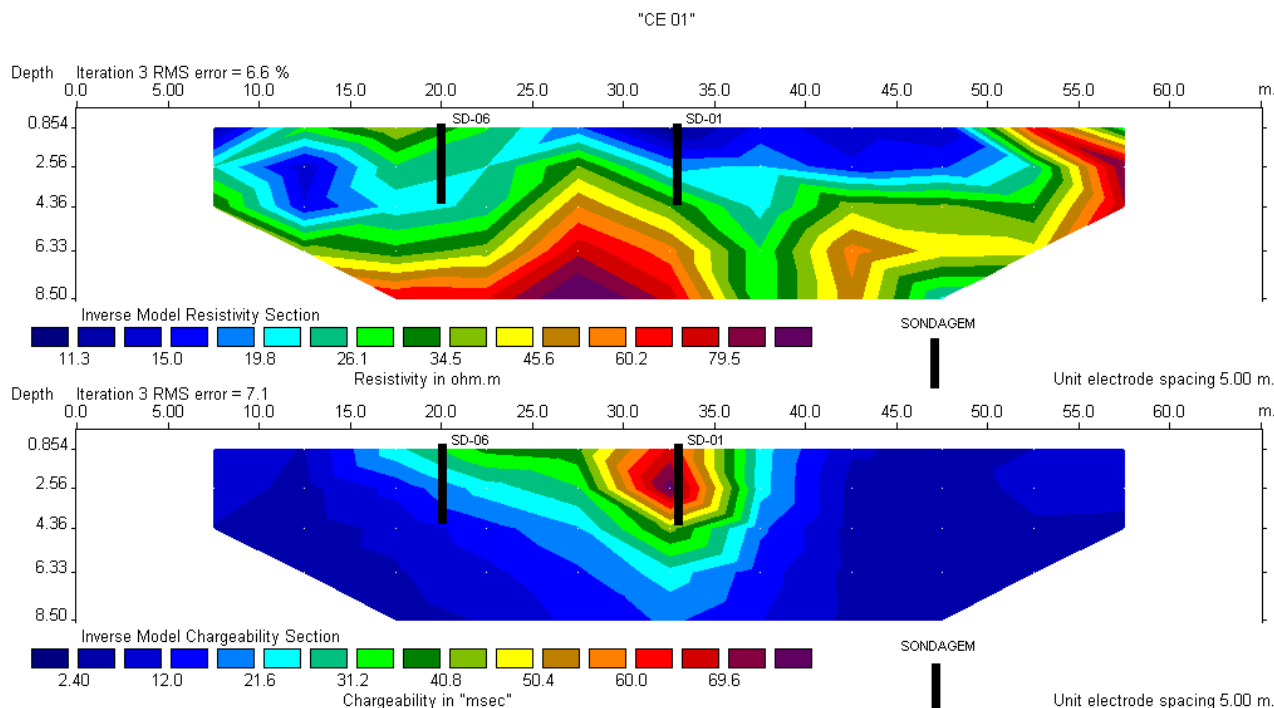


Figura 5.32 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade da linha CE 01, indicando os locais onde foram feitas as sondagens SD-01 e SD-06 e coletadas as amostras.

Tabela 5.1 - Resultados analíticos das amostras SD-01 e SD-06, coletadas sobre o caminhamento elétrico CE 01, nas distâncias de 33 e 20 metros, respectivamente.

Amostra	UFC/g	Amostra	UFC/g
SD-01 (1m)	0	SD-06 (1m)	0
SD-01 (2m)	0	SD-06 (2m)	0
SD-01 (3m)	0	SD-06 (3m)	0
SD-01 (4m)	0	SD-06 (4m)	0

Através das descrições do solo realizadas em campo (Tabelas 5.2 e 5.3) foram observadas as principais propriedades organolépticas das amostras, onde ficou evidenciado o forte cheiro de solvente, assim como coloração amarela e branca do solo e textura com aspecto oleoso (Figura 5.33) principalmente na amostra SD-01. Este local pode ser considerado como um pequeno depósito com resíduos diversos (inorgânicos – latas, metais, tecidos, entre outros) e com elevadas concentrações de contaminantes orgânicos (restos de tintas e solventes).

A coleta de amostras para a contagem de bactérias revelou que a área tinha grande quantidade de metais, além de grande quantidade de tinta pura.

Apresentação e Discussão dos Resultados

Tabela 5.2 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-01 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.

Amostra SD-01	Descrição
1m	Solo siltoso marrom, com muito resíduo de tinta cor branca e amarela com forte odor de solvente.
2m	Solo com muito resíduo escuro de aspecto oleoso. Ocorrem pedaços de latas, metais e tecidos.
3m	Silte argiloso, pouco coeso e pouco plástico, com pouca areia fina, marrom avermelhado, com odor de solvente e aspecto oleoso.
4m	Silte argiloso, pouco coeso e pouco plástico, com pouca areia fina, marrom avermelhado, com odor de solvente.

Tabela 5.3 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-06 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.

Amostra SD-06	Descrição
1m	Silte argiloso, pouco coeso e pouco plástico, com coloração marrom avermelhada, com forte odor de solvente.
2m	Silte argiloso, pouco coeso e pouco plástico, com coloração marrom avermelhada, com forte odor de solvente.
3m	Silte argiloso, medianamente coeso e pouco plástico, com coloração marrom avermelhada, com forte odor de solvente.
4m	Silte argiloso, pouco coeso e pouco plástico, com pouca areia fina, com coloração marrom avermelhado, com odor de solvente.



Figura 5.33 - Solo retirado do furo de sondagem SD-01 com aspecto oleoso, coloração amarela e branca com forte cheiro de solvente. Na elipse vermelha, detalhe do pedaço de metal retirado do furo.



Figura 5.34 - Solo retirado do furo de sondagem SD-01 com aspecto oleoso, coloração amarela e branca com forte cheiro de solvente. Na elipse vermelha, detalhe do pedaço de tecido retirado do furo.

Sobre o caminhamento elétrico CE 02 foi realizada a sondagem SD-02 (na distância de 37 metros) como pode ser visualizado na Figura 5.35. A Tabela 5.4 mostra os resultados analíticos da amostra SD-02. Em todas as profundidades as amostras não apresentaram unidades formadoras de colônias.

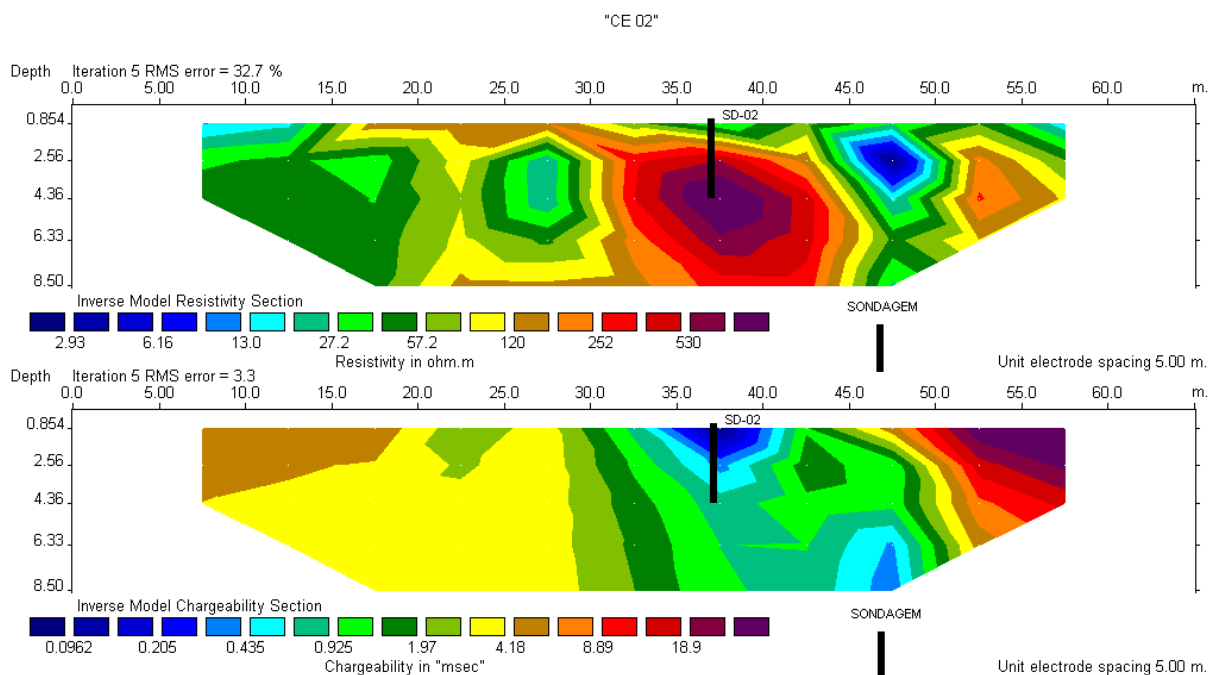


Figura 5.35 - Seção de resistividade elétrica e cargabilidade da linha CE 02, indicando o local onde foi feita a sondagem SD-02 e coletadas as amostras.

Tabela 5.4 - Resultados analíticos da amostra SD-02, coletada sobre o caminhamento elétrico CE 02, na distância de 37 metros.

Amostra	UFC/g
SD-02 (1m)	0
SD-02 (2m)	0
SD-02 (3m)	0
SD-02 (4m)	0

Através da descrição do solo realizada em campo (Tabela 5.5) observaram-se as principais propriedades organolépticas das amostras, onde ficou evidenciado o forte cheiro de solvente e tinta, assim como coloração rosa do solo, conforme pode ser observado na Figura 5.36.

O fato de não ocorrer bactérias nas amostras das sondagens SD-01 e SD-02 está de acordo com o efeito previsto por Moreira & Dourado (2007), onde o processo de bioremediação pode ficar limitado às zonas periféricas da pluma de contaminação, pois a presença de contaminante em elevadas concentrações pode tornar o ambiente hostil à proliferação de bactérias (Rabus & Heider, 1998). Assim, conclui-se que as anomalias de baixa resistividade e alta cargabilidade foram geradas pela presença de materiais polarizáveis (metais) na área, e as anomalias de alta resistividade e baixa cargabilidade foram geradas pela presença do contaminante bruto (sedimento impregnado por tinta pura, tipicamente resistiva).

Tabela 5.5 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-02 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.

Amostra SD-02	Descrição
1m	Silte argiloso, pouco coeso e pouco plástico, com resíduo de tinta cor rosa, com forte odor de solvente.
2m	Silte argiloso, pouco coeso e pouco plástico, de coloração laranja avermelhado, com forte odor de solvente
3m	Silte argiloso, com pouca areia fina, pouco coeso e pouco plástico, com coloração laranja avermelhado.
4m	Silte argiloso, com pouca areia fina, pouco coeso e pouco plástico, com coloração amarelo avermelhado.

A sondagem SD-03 foi realizada sobre o caminhamento elétrico CE 03. Com o objetivo de correlacionar a anomalia de baixa resistividade com a possível ocorrência de biodegradação inerente. As amostras foram coletada no ponto SD-03 (20 metros na seção) como pode ser visualizado na Figura 5.37.

Os resultados analíticos da amostra SD-03 são mostrados na Tabela 5.6, e de fato, em todas as profundidades as amostras apresentaram unidades formadoras de colônias.



Figura 5.36 - Solo retirado do furo de sondagem SD-02 com coloração rósea e forte cheiro de solvente.

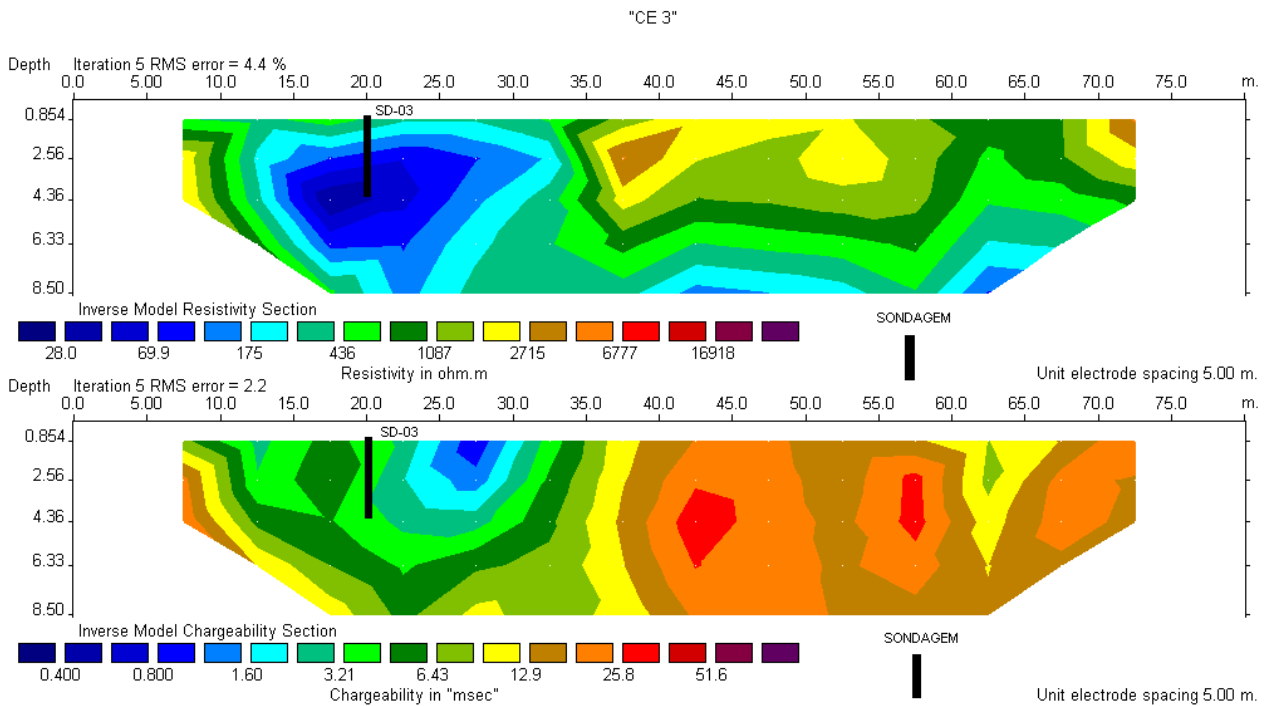


Figura 5.37 - Seção de resistividade elétrica e cargabilidade da linha CE 03, indicando o local onde foi feita a sondagem SD-03 e coletadas as amostras.

Tabela 5.6 - Resultados analíticos da amostra SD-03, coletada sobre o caminhamento elétrico CE 03, na distância de 20 metros.

Amostra	UFC/g
SD-03 (1m)	3,85 x 10 ⁵
SD-03 (2m)	0,078 x 10 ⁵
SD-03 (3m)	0,106 x 10 ⁵
SD-03 (4m)	0,087 x 10 ⁵

A Tabela 5.7 mostra a descrição do solo realizada em campo, onde foram observadas as principais propriedades organolépticas das amostras e os aspectos como textura e coloração do solo.

Tabela 5.7- Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-03 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.

Amostra SD-03	Descrição
1m	Silte argiloso, medianamente coeso e medianamente plástico, com coloração amarelo acinzentado.
2m	Silte argiloso, com pouca areia fina, medianamente coeso e pouco plástico, com coloração amarelo acinzentado.
3m	Silte argiloso, com pouca areia fina, medianamente coeso e pouco plástico, com coloração amarelo acinzentado.
4m	Silte argiloso, com pouca areia fina, medianamente coeso e medianamente plástico, com coloração amarelo acinzentado.

A sondagem SD-04, realizada sobre o caminhamento elétrico CE 04 na distância de 37 metros (um local com altas resistividades), é visualizada na Figura 5.38. Os resultados analíticos da amostra SD-04 são mostrados na Tabela 5.8. Apesar de bactérias terem sido encontradas em até 1 metro de profundidade, sua quantidade foi inferior a quantidade encontrada em qualquer uma das amostras da anomalia condutora da linha CE-03. Esses resultados eram esperados, devido à alta resistividade medida para essa zona.

Apresentação e Discussão dos Resultados

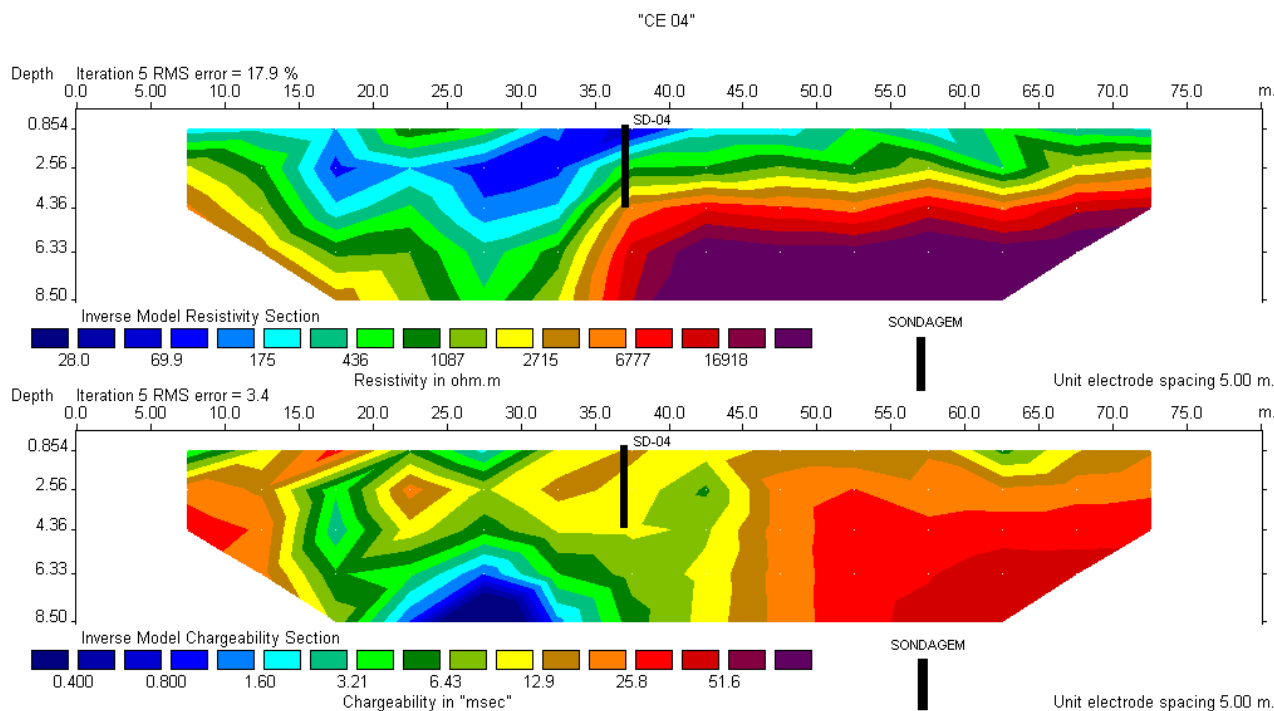


Figura 5.38 - Seção de resistividade elétrica e cargabilidade da linha CE 04, indicando o local onde foi feita a sondagem SD-04 e coletadas as amostras.

Tabela 5.8 - Resultados analíticos da amostra SD-04, coletada sobre o caminhamento elétrico CE 04, na distância de 37 metros.

Amostra	UFC/g
SD-04 (1m)	0,003 x 10 ⁵
SD-04 (2m)	0
SD-04 (3m)	0
SD-04 (4m)	0

A Tabela 5.9 mostra a descrição do solo realizada em campo, onde foram observadas as principais propriedades organolépticas das amostras e os aspectos como textura e coloração do solo.

Tabela 5.9 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-04 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.

Amostra SD-03	Descrição
1m	Silte argiloso com muscovita, medianamente coeso e medianamente plástico, com coloração branca.
2m	Silte argiloso com muscovita, com pouca areia fina, medianamente coeso e medianamente plástico, com coloração branca.
3m	Silte argiloso com muscovita, com pouca areia fina, medianamente coeso e pouco plástico, com coloração branca.
4m	Silte argiloso com muscovita, com pouca areia fina, pouco coeso e pouco plástico, com coloração branca.

Neste local das sondagens SD-03 e SD-04 sabe-se que o episódio de contaminação se deu há 30 anos atrás, sendo, portanto anterior ao depósito de resíduos da outra área situada mais ao norte. Em áreas com contaminação cronologicamente mais antiga, o meio passa a ser menos resistivo em relação ao meio natural. Provavelmente, reações químicas e/ou atividade biológica presente nestas zonas causam a diminuição na resistividade e de fato, como pode ser observado, a zona de contaminação é caracterizada por baixos valores de resistividade associados aos baixos valores de cargabilidade.

Sobre o caminhamento elétrico CE 05 foi realizada a sondagem SD-05, com o objetivo de correlacionar a anomalia de baixa resistividade com a possível ocorrência de biodegradação inerente, as amostras foram coletadas na distância de 60 metros, como pode ser visualizado na Figura 5.39. Os resultados analíticos da amostra SD-05 são mostrados na Tabela 5.10. Apenas nas profundidades de 1 e 2 metros ocorrem unidades formadoras de colônias.

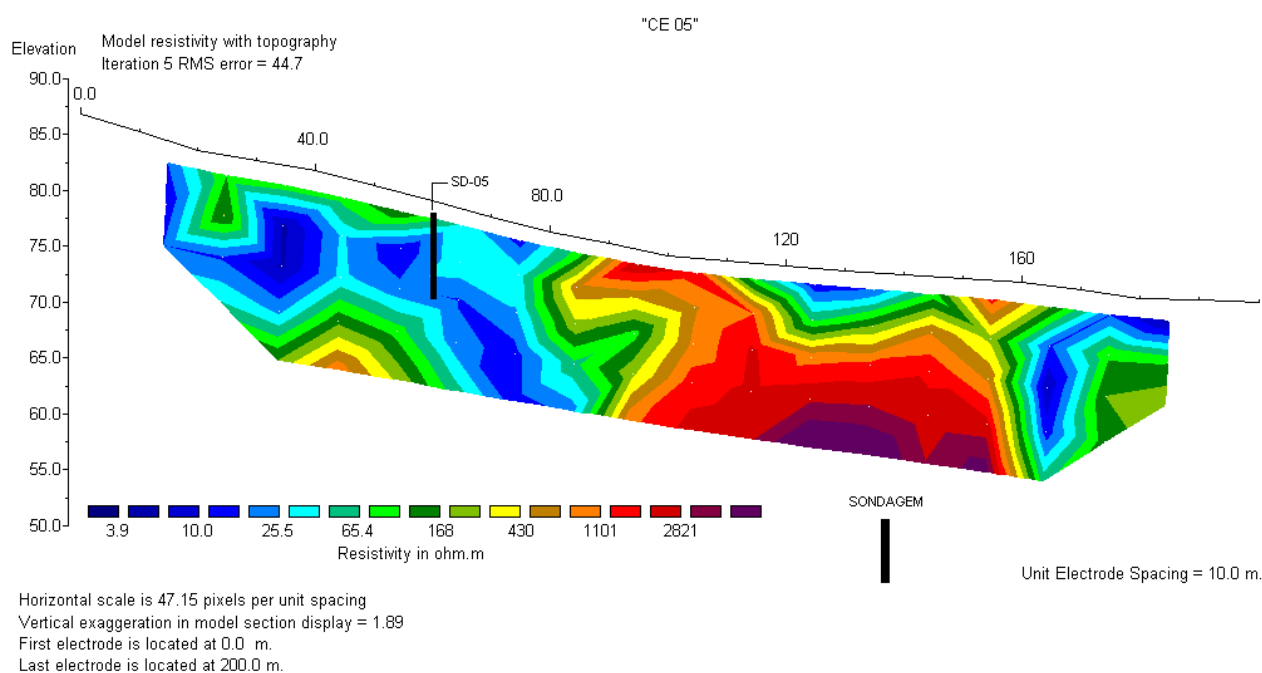


Figura 5.39 - Seção de resistividade elétrica da linha CE 05, indicando o local onde foi feita a sondagem SD-05 e coletadas as amostras.

Tabela 5.10 - Resultados analíticos da amostra SD-05, coletada sobre o caminhamento elétrico CE 05, na distância de 60 metros.

Amostra	UFC/g
SD-05 (1m)	0,113 x 10 ⁵
SD-05 (2m)	0,003 x 10 ⁵
SD-05 (3m)	0
SD-05 (4m)	0

Através da descrição do solo realizada em campo (Tabela 5.11) observaram-se as principais propriedades organolépticas das amostras, onde ficaram evidenciados os aspectos com textura e coloração do solo.

Tabela 5.11 - Descrição do solo realizada em campo da amostra SD-05 nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 metros.

Amostra SD-05	Descrição
1m	Silte argiloso, medianamente coeso e medianamente plástico, de coloração marrom avermelhado, com forte odor de solvente.
2m	Silte argiloso, com pouca areia fina, medianamente coeso e medianamente plástico, de coloração marrom avermelhado, com forte odor de solvente.
3m	Silte argiloso, com pouca areia fina, pouco coeso e pouco plástico, de coloração marrom avermelhado, com forte odor de solvente.
4m	Silte argiloso, com pouca areia fina, pouco coeso e pouco plástico, de coloração marrom avermelhado, com forte odor de solvente.

Nesta área a atividade bacteriana pode estar relacionada à pluma de contaminação, que transporta os contaminantes orgânicos das áreas fontes localizadas no interior da indústria, até este local.

Em síntese, podem ser assim descritas as características de cada local:

- Na parte norte foi observada uma maior concentração de contaminantes, pois ali foram armazenados tambores contendo resíduos de solventes e outros materiais em áreas não impermeabilizadas, constituindo um pequeno depósito de resíduos diversos (inorgânicos – latas, metais, tecidos, entre outros) com elevadas concentrações de contaminantes orgânicos (restos de tintas e solventes).
- Na área localizada à leste da indústria, onde ocorreu um episódio de contaminação pontual relacionado a um antigo acidente, observou-se uma menor concentração de contaminantes, um meio menos resistivo e a presença da atividade bacteriana.
- Na região localizada próxima a barreira hidráulica a contaminação ocorre como resultado do deslocamento da pluma provinda das áreas à montante, devido ao sentido do fluxo da água subterrânea estar direcionado para essa área.

CAPÍTULO 6

6 Conclusões

Levantamentos de campo foram realizados na área de uma indústria química, na cidade de São Paulo – SP, com histórico de contaminação por compostos organoclorados, além de benzeno, tolueno e xilenos, com a finalidade de avaliar a potencialidade dos métodos eletromagnético indutivo, eletroresistividade e polarização induzida na detecção e mapeamento das áreas afetadas. Os resultados obtidos mostram o grande potencial de aplicação integrada destes métodos na avaliação ambiental da área de estudo. Os métodos utilizados forneceram uma grande quantidade de dados e informações que permitiram uma análise da área de estudo quanto às relações entre os resíduos e o meio físico. As principais conclusões obtidas nesta pesquisa estão descritas a seguir.

Através das medidas dos níveis d'água e das cotas dos poços de monitoramento foram elaborados mapas potenciométricos que permitiram a definição do sentido preferencial do fluxo da água subterrânea, para leste-nordeste, no sentido da represa de Guarapiranga.

A partir dos dados eletromagnéticos foi possível delimitar de forma clara a área de abrangência da contaminação gerada pelos resíduos. Isto ficou evidenciado principalmente nos mapas de caracterização geral, que sugerem contaminação bastante acentuada, com maiores dimensões e altos valores de condutividade aparente (> 100 mS/m) nas profundidades de 7,5 e 15 metros, concentrada principalmente na parte nordeste da área. Também ocorrem áreas anômalas, na região leste da área, com valores de condutividade aparente moderada (>70 mS/m), também indicando contaminação, porém menos intensa. Já em profundidades maiores, como em 30 metros, a zona anômala apresenta valores de condutividade aparente não tão elevados, em torno de 50 mS/m, e dimensões reduzidas, caracterizando a diminuição da concentração de contaminantes em maiores profundidades.

A topografia, associada ao sentido do fluxo da água subterrânea (leste-nordeste), indica claramente que a contaminação está concentrada a jusante da área (nordeste) e que ela está se

deslocando no mesmo sentido do fluxo. Este padrão da contaminação corrobora com o que foi observado nos perfis individuais de cada linha de caminamento eletromagnético.

Assume-se então que as porções mais a leste e nordeste da área são as que apresentam as maiores concentrações de contaminantes.

As interpretações quantitativas, modelagem com vínculo de suavização, dos dados obtidos pelo levantamento elétrico 2D (resistividade e IP) mostraram que as anomalias de resistividade e cargabilidade vistas nas seções CE 01 e CE 02 podem ser interpretadas como produto da grande quantidade de metal e de outros resíduos inorgânicos encontrados na área. Assim, sugere-se que as anomalias de baixa resistividade ($< 26,1 \Omega.m$) e alta cargabilidade ($> 40,8 \text{ msec}$) podem ser resultado da presença de materiais polarizáveis (metais) na área, e as anomalias de alta resistividade ($> 57,2 \Omega.m$) e baixa cargabilidade ($< 1,0 \text{ msec}$) podem ser resultado da presença do contaminante bruto (sedimento impregnado por tinta pura, tipicamente resistiva). Sugere-se através destes fatores que esta região apresenta uma contaminação temporalmente mais recente.

As anomalias condutivas vistas na seção de resistividade elétrica CE 05, sugerem um deslocamento da contaminação em direção a represa. As anomalias de baixa resistividade ($< 65,4 \Omega.m$) sugerem que o resíduo tornou-se menos resistivo ao longo do tempo devido ao processo de biodegradação e que não ocorre neste local a presença de contaminante bruto.

Observou-se uma forte correlação da seção CE 05 com as linhas EM 4.1 e EM 4.2. Ambas possuem um mesmo padrão em relação à forma das seções e a localização das anomalias. A seção de cargabilidade da linha de caminamento elétrico CE 05 não pôde ser considerada nesse estudo, pois os dados obtidos foram muito ruidosos.

As anomalias condutivas vistas nas seções CE 03 e CE 04 sugerem uma contaminação cronologicamente mais antiga. Assim, as anomalias de baixa resistividade ($< 130 \Omega.m$) associadas a anomalias de baixa cargabilidade ($< 4 \text{ msec}$) sugerem que o resíduo tornou-se menos resistivo ao longo do tempo devido ao processo de biodegradação.

O imageamento das feições identificadas pelo modelo de resistividade coincide com as feições identificadas pelo modelo de cargabilidade. Entretanto, devido aos grandes contrastes observados, essas feições são mais facilmente interpretadas pelo método de resistividade. Além disso, a ocorrência do fenômeno de polarização induzida e sua magnitude são afetadas por diversos fatores, o que torna a interpretação destes dados mais complexa.

Em regiões com alterações significativas nas medidas de resistividade e cargabilidade, foram selecionados os locais para as coletas das amostras e realização das análises bacteriológicas do solo. Nas sondagens SD-01 e SD-02 não foram encontradas unidades formadoras de colônias em

nenhuma profundidade. Através da descrição do solo realizada em campo ficou comprovada a presença de contaminante bruto e metais nestes locais.

Dessa forma conclui-se que as anomalias de baixa resistividade e alta cargabilidade foram geradas pela presença de materiais polarizáveis, e as anomalias de alta resistividade e baixa cargabilidade foram geradas pela presença do contaminante bruto. O fato de não haver bactérias nesta área pode ser explicado pela presença de contaminante bruto (sedimento impregnado por tinta pura) em elevadas concentrações, o que de acordo com Rabus & Heider (1998) pode tornar o ambiente hostil à proliferação de bactérias.

Na sondagem SD-03 em todas as profundidades as amostras apresentaram unidades formadoras de colônias. Apesar de bactérias terem sido encontradas em até 1 metro de profundidade na sondagem SD-04, sua quantidade foi inferior a quantidade encontrada em qualquer uma das amostras da sondagem SD-03. Esses resultados eram esperados, devido à maior resistividade medida para essa zona. Na sondagem SD-05 apenas nas profundidades de 1 e 2 metros ocorrem unidades formadoras de colônias. Nestes casos a atividade bacteriana ocorre em locais de contaminação antiga (sondagens SD-03 e SD-04) e na área com contaminantes transportados pelas águas subterrâneas (SD-05).

A associação dos dados elétricos e eletromagnéticos com os dados obtidos através das investigações diretas possibilitou uma boa caracterização ambiental da área, fornecendo informações quanto ao comportamento e localização da contaminação. A contaminação existente é identificada pelos ensaios geofísicos e confirmada pelas análises químicas da água subterrânea e pelos resultados das análises bacteriológicas.

É importante lembrar que a integração dos dados geofísicos aos dados de investigações diretas existentes no local foram imprescindíveis para ajustar e refinar os modelos obtidos.

Referências

- ABDEL, AAL, G.Z.; ATEKWANA, E.A. 2003. Induced polarization (IP) measurements of soils from an aged hydrocarbon contaminated site. In: Symposium on The Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Proceedings...Environmental & Engineering Geophysical Society. p. 190- 201.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1987. Amostragem de resíduos. NBR.10007. Rio de Janeiro. 14p
- AQUINO, V.F. 2000. Métodos geofísicos eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico do solo e das águas subterrâneas em área de infiltração de resíduos industriais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 121 p.
- ATEKWANA, E.A.; SAUCK, W.A. & WERKEMA Jr., D.D. 2000. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. Journal of Applied Geophysics, 44. p. 167 – 180.
- ATEKWANA, E.A.; ATEKWANA, E.A.; ROWE, R.S.; WERKEMA, D.D. & LEGALL, F.D. 2004. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. Journal of Applied Geophysics 56. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, p. 281-294.
- BARKER, R.D. 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. Geophysics, 54: 1031-1037.
- BENSON, A.K. & STUBBEN M.A. 1995. Interval resistivities and very low frequency electromagnetic induction – an aid to detecting groundwater contamination in space and time: a case study. Environmental Geosciences, 2: 74-84.
- BENSON, R.C.; GLACCUM, R.A. & NOEL, M.R. 1982. Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 236p.
- BENSON, A.K; PAYNE, K.L & STUBBEN, M.A. 1997. Mapping ground-water contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods - A case study. Geophysics, Vol. 62(1): 80-86.
- BERNSTONE C, DAHLIN T, OHLSSON T & HOGLAND W. 2000. DC resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excitation surveys. Environmental Geology, Vol. 39 (3-4): 360-371.
- BORGES, W.R. 2007. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, São Paulo, SP. 256 p.

- BÖRNER, F.; GRUHNE, M.; SCHÖN, J. 1993. Contamination Indications Derived from Electrical Properties in the Low Frequency Range. *Geophysical Prospecting*. Vol. 41, p. 83 – 98.
- BRAGA, A. C. O. 1997. Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e Geotécnica Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro-SP. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 200 p.
- BRAGA, A. C. O. 1999. Métodos de prospecção em hidrogeologia. Apostila interna do Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- BRAGA, A.C.O. & CARDINALI, M.T. 2005. Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de Hidrocarbonetos. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 23(2): 181-190.
- CARTWRIGHT, K. & McCOMAS, M.R. 1968. Geophysical surveys in the vicinity of sanitary landfills in northcastern Illinois. *Ground Water*. Ohio-USA. Vol.6 (5): 23-30.
- CASSIDY, D.P; WERKEMA, D.D. Jr.; SAUCK, W.; ATEKWANA, E.; ROSSBACH, S. & DURIS, J. 2001. The Effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, Vol. 6(1): 47-52.
- CHERRY, J.A. 1987. Groundwater Contamination by Petroleum Products. Paper presented at the Twelfth World Petroleum Congress. Houston, Texas. p. 115-123.
- CHERRY, J.A.; FEENSTRA, S.; KUEPER, B.H.; McWHORTER, D.W. 1990. Status of in Situ Technologies for Cleanup of Aquifer Contaminated by DNAPLs Below the Water Table. Paper prepared for: International Specialty Conference on How Clean is Clean? Cleanup Criteria for Contaminated Soil and Groundwater Air and Waste Management Association. 17p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. 1999. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo, CETESB, p. 372. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/areas_contaminadas/anexos/download/6200.pdf
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. 2005. Valores orientadores para solo e águas subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo, CETESB, p. 4. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf
- DAHLIN, T. 2000. Short Note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 48, p. 181-187.
- DAHLIN, T.; ZHOU, B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, p. 379-398.
- DALAN, R.A. 1991. Definig archaeological features with electromagnetic surveys at the Cahokia Mounds State Historic Site. *Geophysics*, Vol. 56 (8): 1280-1287.
- DOOLITTLE, J.A.; M.E. COLLINS. 1998. A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst. *Geoderma*, Vol. 85: 83 – 102.

- EBRAHEEM, A.M.; HAMBURGER, M.W.; BAYLESS, E.R.; KROTHER, N.C.1990. A Study of Acid Mine Drainage using earth resistivity measurements. *Ground Water*. Vol. 28 (3): 361-368.
- EDWARDS, L. S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, p. 1020 – 1036.
- EHRlich, H.L. 1996. How microbes influence mineral growth and dissolution. *Chemical Geology*, 132: 5-9.
- ELIS, V.R.; BARROSO, C.R. & KIANG, C.H. 2004. Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do sistema aquífero Barreiras/ Marituba em Maceió – AL. *Revista Brasileira de Geofísica*. Vol. 22 (2): 101-113.
- ELIS, V.R. 1999. Avaliação de aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 264 p.
- ELIS, V.R & ZUQUETTE, L.V. 1996. Caminhamento elétrico dipolo-dipolo – Uma técnica eficiente na investigação de depósitos de resíduos. In: Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, 8., Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: ABGE. p. 39 – 49.
- ELIS, V.R & ZUQUETTE, L.V.2002. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo – SP. Vol. 32. p. 119 – 134.
- ELLERT, N.; ROSS, S.; MENDES, J.M.B. & MARTIN, E. 1990. Mapeamento Geofísico do Lixão de São Carlos. Anais do VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Porto Alegre-RS, pp. 82-88.
- EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1998. Technical Protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water. Washington DC, epa/600/r-98/128.
- EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1999. Microbial processes affecting monitored natural attenuation of contaminants in the subsurface. Ada, Oklahoma, epa/540/s-99/001.
- EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2004. Use of monitored natural attenuation at Superfund, RCRA corrective action, and Underground Storage Tank sites. Office of Solid Waste and Emergency Response, Directive 9200. p. 4-17, Chapter IX Monitored Natural Attenuation, final version. 2004. Disponível em: <<http://www.epa.gov>> . Acesso em 12 fev. 2009.
- FACHIN, S.J.S. 2007. Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema. Tese de Mestrado. . Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, São Paulo, SP.142 p.
- GALLAS, J.D.F. 2000. Principais Métodos Geoeletricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP.174 p.

- GEOTOMO SOFTWARE. RES2DINV, version 3.53. 2003. Rapid 2D resistivity & Ip inversion using the least-square method – Geoelectrical Imaging 2-D & 3-D, Geotomo Software, Penang, Malaysia. 129 p.
- GOLDSTEIN, N.E.; BENSON, S.M. & ALUMBAUGH, D. 1990. Saline Groundwater Plume Mapping with Electromagnetics. Geotechnical and Environmental Geophysics, Investigations in Geophysics, S.E.G., Vol. II (5): 17-27.
- GOMES, M.J. da S., 2003. Utilização de métodos geofísicos em sambaquis fluviais, região do Vale do Ribeira de Iguape. Dissertação de Mestrado (Departamento de Arqueologia), FFLCH/USP, São Paulo, SP, 135 p.
- GREENHOUSE, J.P. & HARRIS, R.D. 1983. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study 7: DC, VLF and inductive resistivity survey. Journal of Hydrology, n. 63, p. 177-197.
- GREENHOUSE, J.P. & SLAINE, D.D. 1986. Geophysical modelling and mapping of contaminated groundwater around three waste disposal sites in southern Ontario. Canadian Geotechnical Journal, Vol.23, p. 372-384.
- GREENHOUSE, J.P.; MONIER-WILLIAMS, M.E.; ELLERT, N.; SLAINE, D.D.1987. Geophysical methods in groundwater contamination studies. Present at EXPLORATION '87, The Third Decennial International Conference on Geophysical and Geochemical Exploration for Minerals and Groundwater. Toronto.
- GRETSKY, P.; BARBOUR, R. & ASIMENIOS, G.S. 1990. Geophysics, pit surveys reduce uncertainty. Pollution Engineering, June, p. 102-108.
- GRIFFITHS, D.H. & BARKER R.D. 1994. Electrical imaging in Archaeology. Journal of Archaeological Science, 21, p. 153-158.
- HARTER, R.D. 1977. Reactions of minerals with organic compounds in soil. Minerals in Soil Environments, Soil Science Society of America. Madison, Ed. Joe. B. Dixon, Chapter 20. 709-739.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT.1981. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. IPT, São Paulo - SP, 2 volumes.
- INTERPEX LIMITED. RESIX IP2DI. 1996. Resistivity and Induced Polarization data interpretation software. Interpex, Golden, Colorado.
- JEWELL, C.M.; HENSLEY, P.J.; BARRY, D.A.; ACWORTH, I. 1993. Site investigation and monitoring techniques for contaminated sites and potential waste disposal sites. In: Geotechnical Management of Waste and Contamination. Rotterdam; Fell, Phillips & Gerard. 33 p.
- KELLY, W.E. 1976. Geoelectric Sounding for Delineating Ground-Water Contamination. Ground Water. Vol.14 (1): 6-10.
- KUEPER, B.H.; HAASE, C.S.; KING, H.L. 1991. Consideration of DNAPL in the Operation and Monitoring of Waste Disposal Ponds Constructed in Fractured Rock and Clay. For publication in Proceedings, **First Canadian Conference on Environmental Geotechnics**. Canadian Geotechnical Society. Montreal, Canada.

- LIMA O.A.L.; SATO H.K. & PORSANI M.J. 1995. Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques. *Journal Applied Geophysics*, 34: 93-108.
- LOKE, M. H. & BARKER, R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44. p. 131 – 152.
- LOKE, M. H. 1999. Software User's Manual. Res2dInv version 3.3. for Windows 3.1 and 95 – Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Penang, Malaysia, 35p.
- LOKE, M. H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys. Report Geotomo LLC, Penang, Malaysia. 67. p.2000
- MACLEAN, H.D., DICKERSON, J.W., HASBROUCK, J.C. & COTTER, E.T. 1991. Geophysical surveys for underground storage tanks locations Hickam Air Force Base, Hawaii: A case study. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Knoxville, USA, p. 323-341.
- MAZÁC, O.; LANDA, I.; KOLINGER, 1980.A. The Feasibility of a Hidrogeological Variant of the mise-a-la-masse method: An analysis. *Journal of Geological Sciences, Hydrogeology and Engineering Geology*, 14, p.147 – 177.
- MENDES, J.M.B. 1987. Técnicas Geofísicas Aplicadas no Mapeamento e Monitoramento de Poluição e Contaminação de Águas Subterrâneas. São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências – USP.
- McMAHON P.B & CHAPELLE F.H. 1991. Microbial production of organic acids in aquitard sediments and its role in aquifer geochemistry. *Nature*, 349: 233-235.
- McNEILL, J.D. 1980. Eletromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Nota técnica n^o 6, Geonics, 15p.
- MOREIRA, C.A. & DOURADO J.C. 2005. Análise de contaminantes de fase líquida não aquosa (NAPLs) por aplicação do método eletromagnético indutivo (EM). *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, Vol. 23 (3): 213-220.
- MOREIRA, C.A.; DOURADO J.C. & BRAGA, A.C.O. 2006. Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, Vol. 24 (3): 383-392.
- NARAYAN, S.; DUSSEAULT, M.B. & NOBES, D.C. 1994. Inversion techniques applied to resistivity inverse problems. *Inverse Problems*, 10. p. 669-686.
- NOBES DC. 1996. Troubled Waters: environmental applications of electrical and electromagnetic methods. *Surveys in Geophysics*. Vol. 17, p. 393-454.
- OLAYINKA, A.I. & YARAMANCI, U. 2000. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 64. p. 63-81.
- OLHOEFT, G.R. 1985. Low-frequency electrical properties. *Geophysics*. Vol.50 (12): 2492-2503.

- ORELLANA, E. 1972. *Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua*. Ed. Paraninfo, Madrid, 523p.
- PARASNIS, D.S. 1986. *Principles of applied geophysics*. 4th ed. Chapman and Hall, London. 420 p.
- PARASNIS, D.S. 1970. *Princípios de geofísica aplicada*. Madrid, Paraninfo. 208 p.
- RABUS R & HEIDER J. 1998. Initial reactions of anaerobic metabolism of alkylbenzenes in denitrifying and sulfate-reducing bacteria. *Archives of Microbiology*, 170: 377-384.
- ROSQVIST, H., DAHLIN, T., FOURIE, A., ROHRS, L., BENGTSSON, A. & LARSSON, M. 2003. Mapping of two leachate plumes at two landfill sites in South Africa using geoelectrical imaging techniques. *Proceedings of Ninth International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita de Pula (Cagliari), Sardinia, Italy, 10p.
- SALLES, F.A.F. 1999. Avaliação de área contaminada por compostos orgânicos às margens da represa de Guarapiranga, no município de São Paulo – SP. Tese (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – SP. 107p.
- SALLES, F.A.F. 2005. Avaliação da eficiência de barreira reativa com ferro zero-valente na remediação de água subterrânea contaminada por compostos orgânicos clorados. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – SP. 100 p.
- SAUCK, W.A. 2000. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes an their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics* 44. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, p. 151 – 165.
- SHARMA, P.V. 1997. *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press, 475 p.
- SHERIFF, R.E. 1989. *Geophysical methods*, Prentice Hall, New Jersey, chapter 9, Electrical and Electromagnetic methods, p. 192-200.
- SILVA, J.E., LOUREIRO, E.M.L., ELIS, V.R., HODO, F.Y. & PORSANI, J.L. 2002. Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em problema de poluição ambiental. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, Vol. 20 (3): 193-198.
- SOGADE, J. A.; SCIRA-SCAPPUZZO, F.; VICHABIAN, Y.; SHI, W.; RODI, W.; LESMES, D. P. MORGAN, F. D. 2006. Induced-polarization detection and mapping of contaminant plumes. *Geophysics*, 71, pp B75-B84.
- STEWART, M.T. 1982. Evaluation of electromagnetic methods for rapid mapping of salt-water interfaces in coastal aquifers. *Ground Water*, Vol.20, (5): 538-545.
- SUMNER, J.S.1976. *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdan, 227p.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. & KEYS, D.A. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 860 p.
- URISH, D.W. 1983. The practical Application of Surface Electrical Resistivity to Detection of Ground-water Pollution. *Ground Water*. Vol. 21 (2): 144-152.

- USTRA, A.T. 2008. Utilização dos métodos eletroresistividade e polarização induzida com aquisição de dados 3D para caracterização geoambiental de uma área à jusante do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru – SP. Tese de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. São Paulo – SP. 205 p.
- VANHALA, H.; SOININEN, H.; KUKKONEN, I. 1992. Detecting Organic Chemical Contaminants by Spectral-induced Polarization Method in Glacial Till Environment. *Geophysics*. Vol. 57 (8): 1014 – 1017.
- VEGA, M.L., OSELLA, A., LASCANO, E. 2003. Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil. *Journal of Applied Geophysics* 54. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, p. 97-109
- WARD, S. H. 1990. Resistivity and Induced Polarization Methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics. Investigations in Geophysics, SEG*. Vol. 5: 147-189.
- WERKEMA Jr., D.D.; ATEKWANA, A.E.; ENDRES, A.L.; SAUCK, W.A.; CASSIDY, D.P. 2003. Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30 (12), 1647, doi: 10.1029/2003GL017346.
- WILSON, S.C. & JONES, K.C. 1993. Bioremediation of soils contaminated with Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs): a review. *Environmental Pollution*, 81: 229-249.
- ZHOU, B.; DAHLIN, T. 2003. Properties and effects of measurements errors on 2D resistivity imaging surveying. *Near Surface Geophysics*, 1, pp 105-117.

ANEXO I

Seções Interpretadas de Resistividade e Cargabilidade das linhas de Caminhamento Elétrico

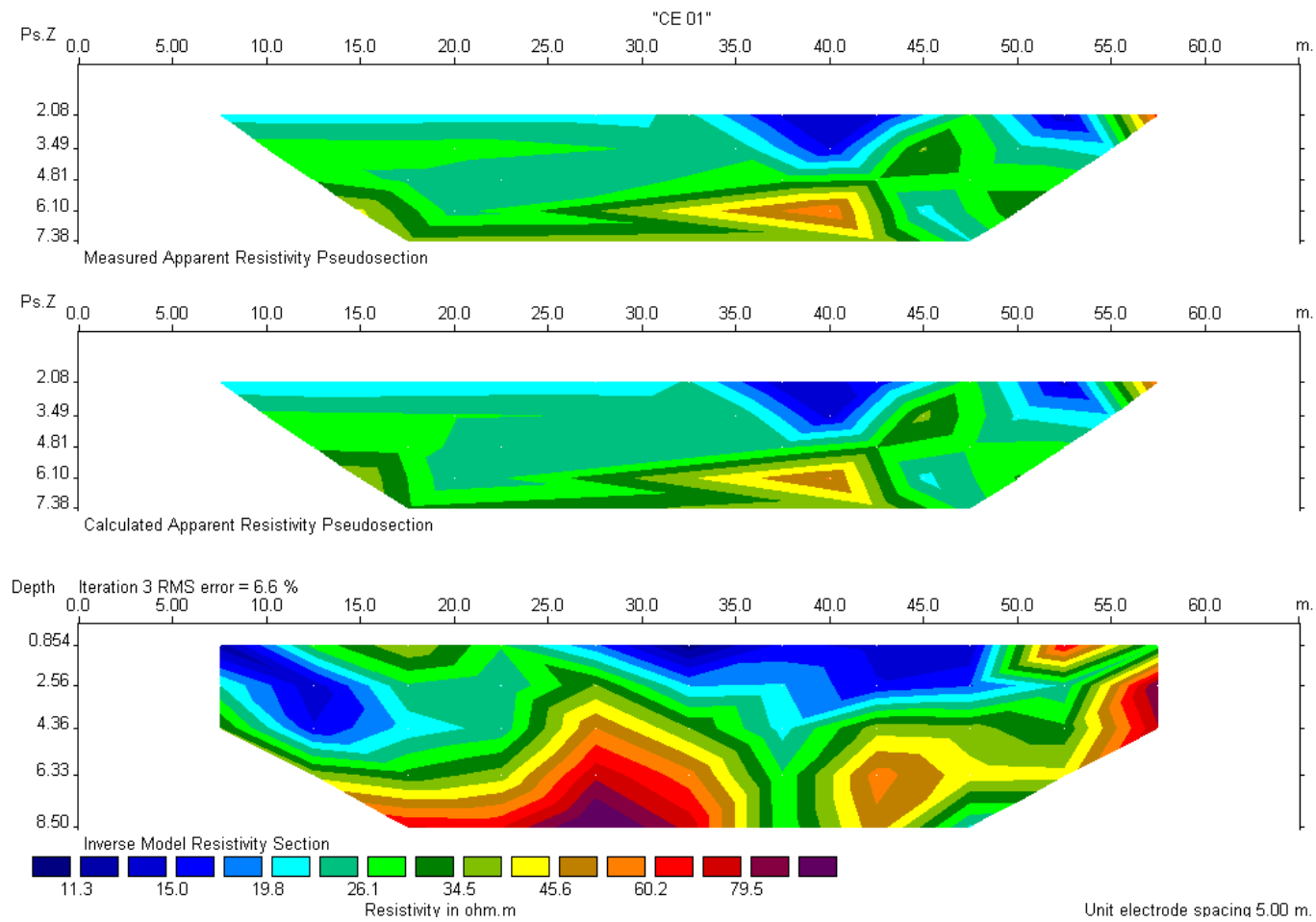


Figura I.1 – Inversão dos dados de resistividade aparente da linha CE 01.

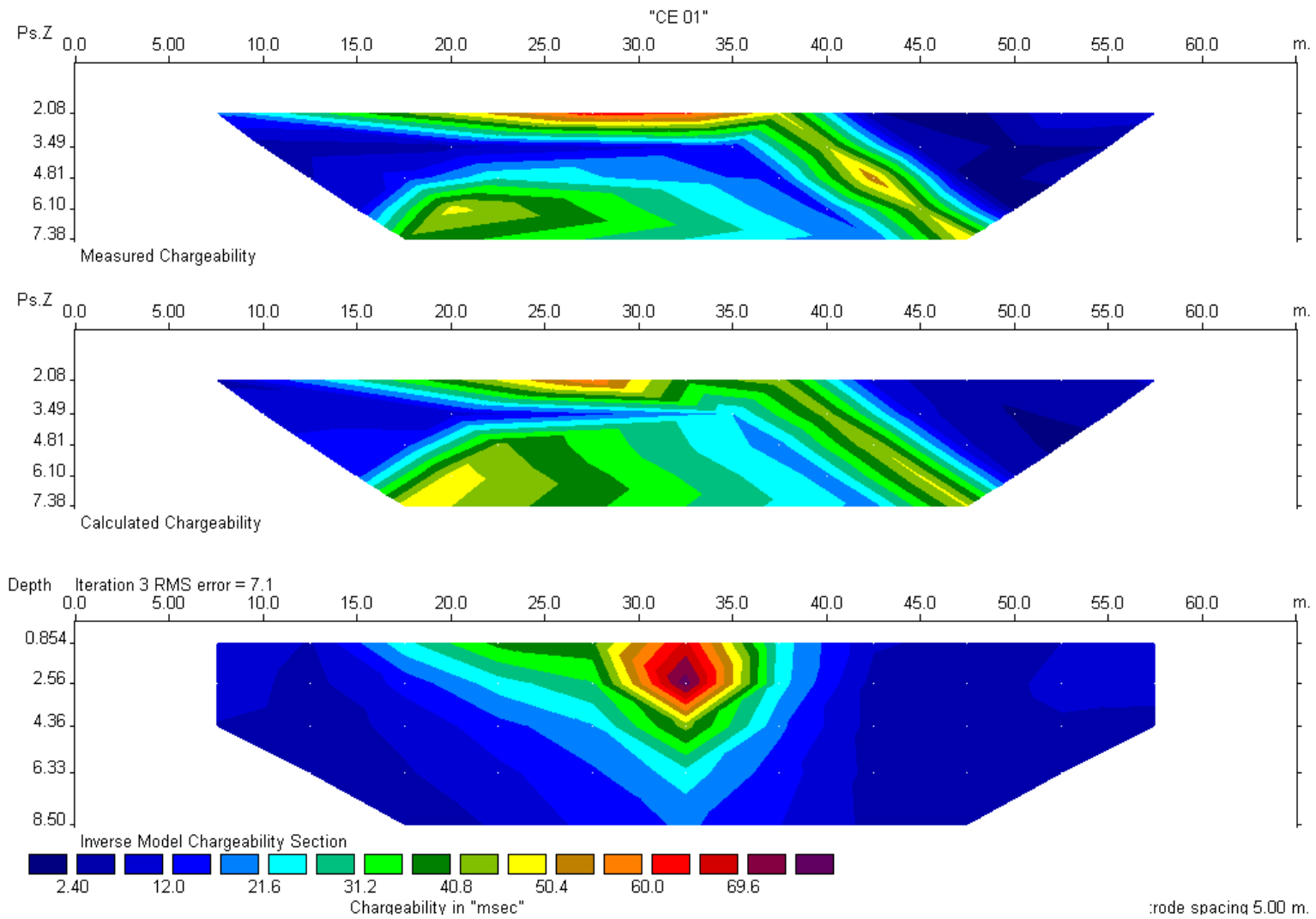


Figura I.2 – Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha CE 01.

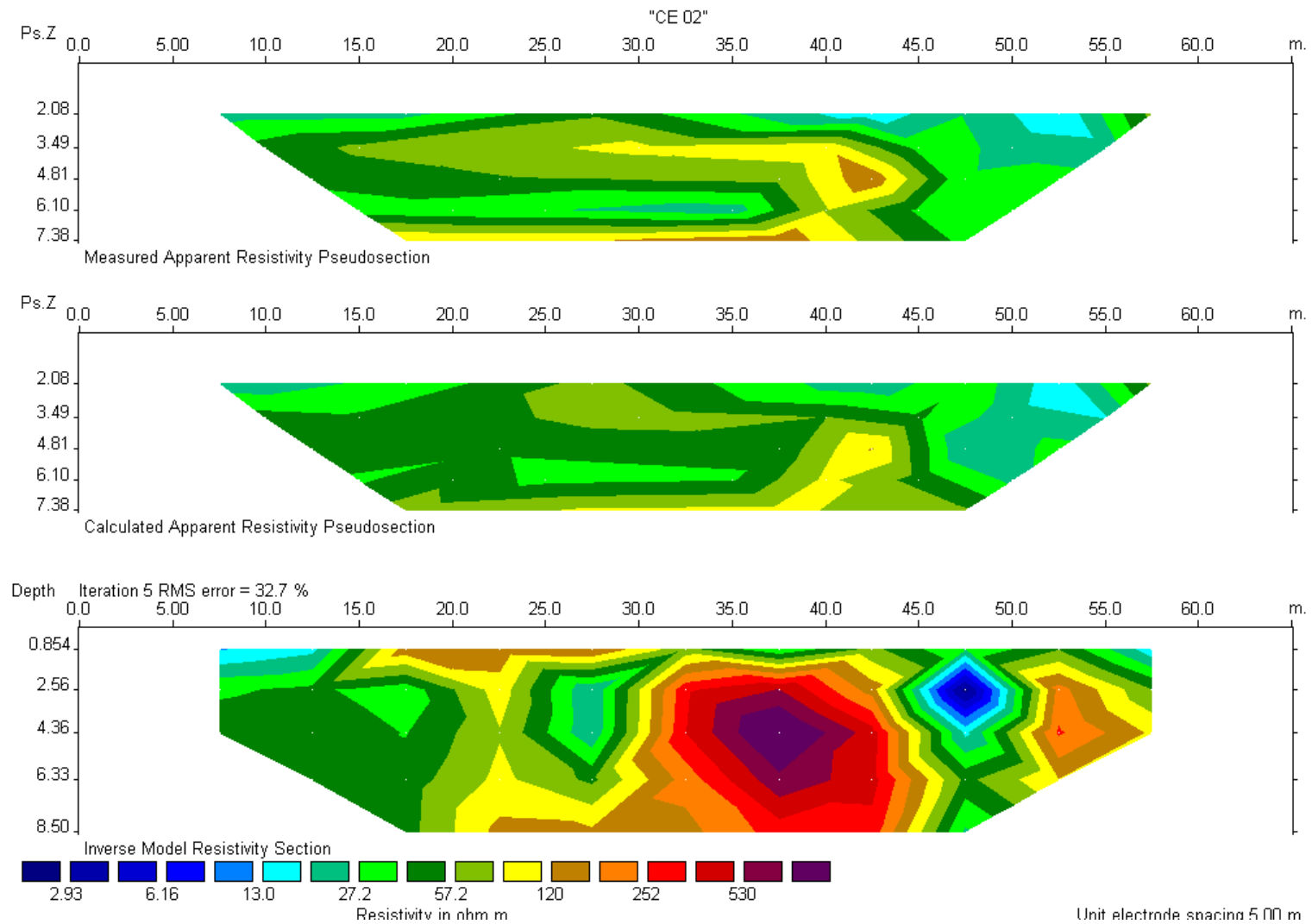


Figura I.3 – Inversão dos dados de resistividade aparente da linha CE 02.

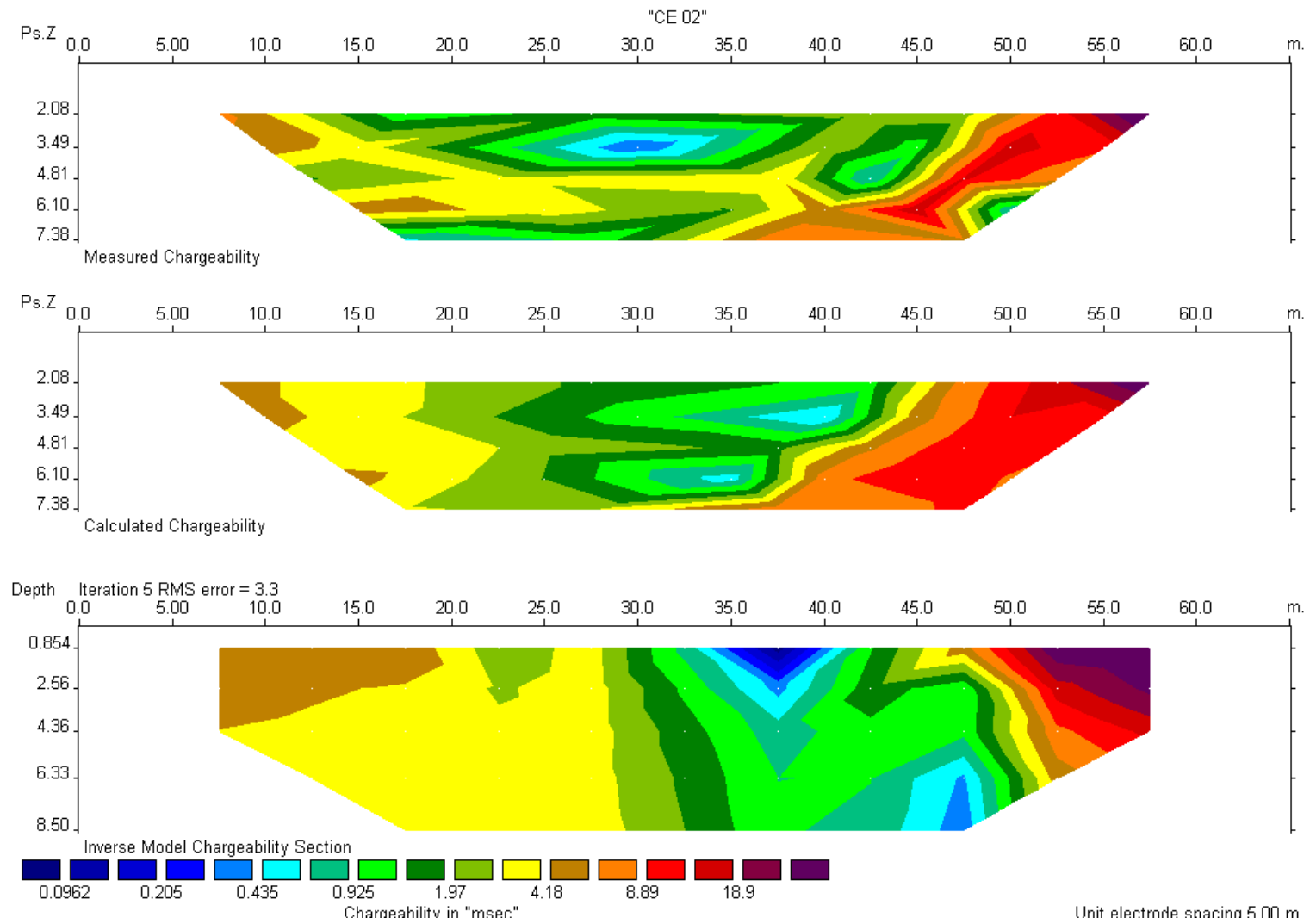


Figura I.4 – Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha CE 02.

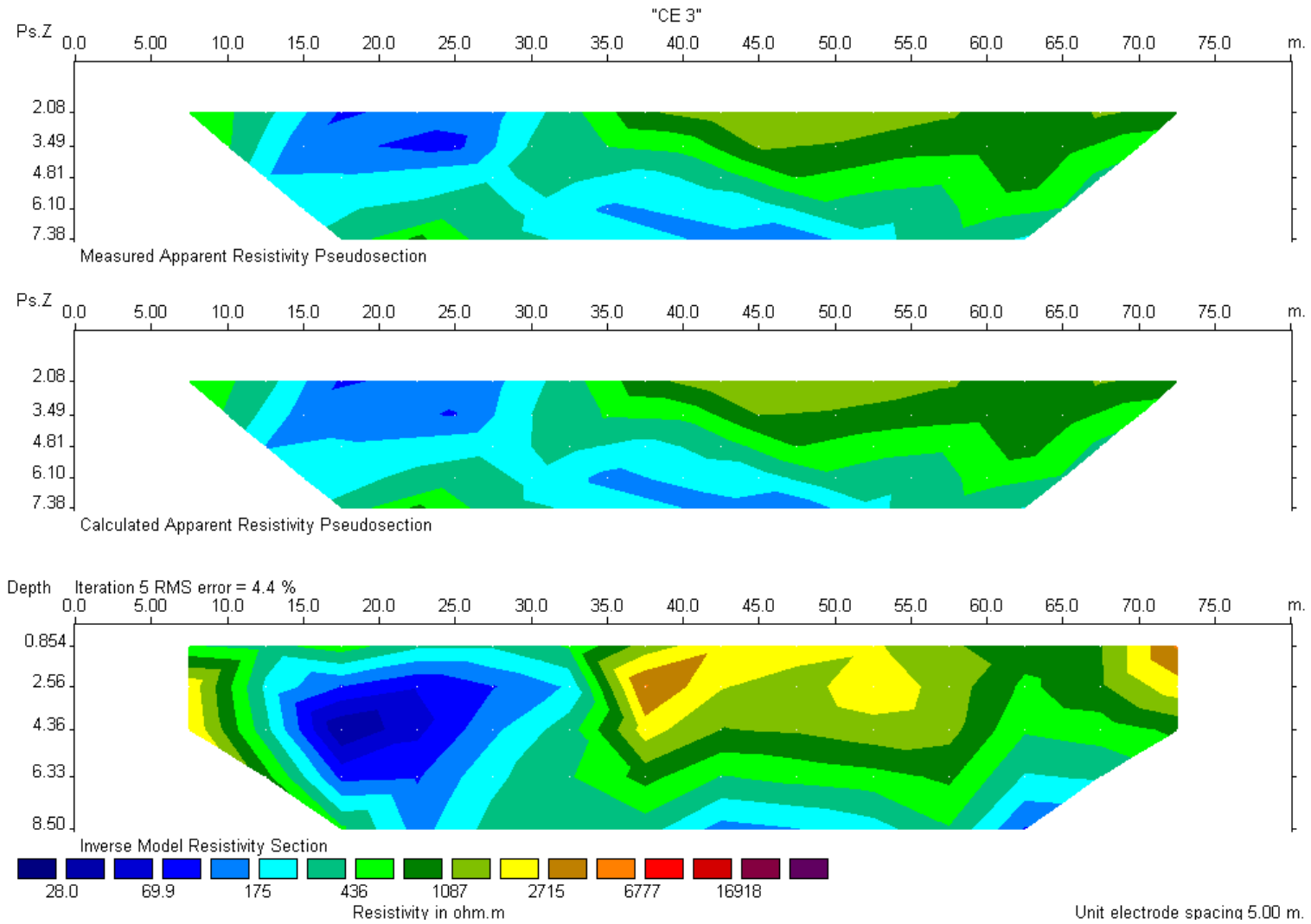


Figura I.5 – Inversão dos dados de resistividade aparente da linha CE 03.

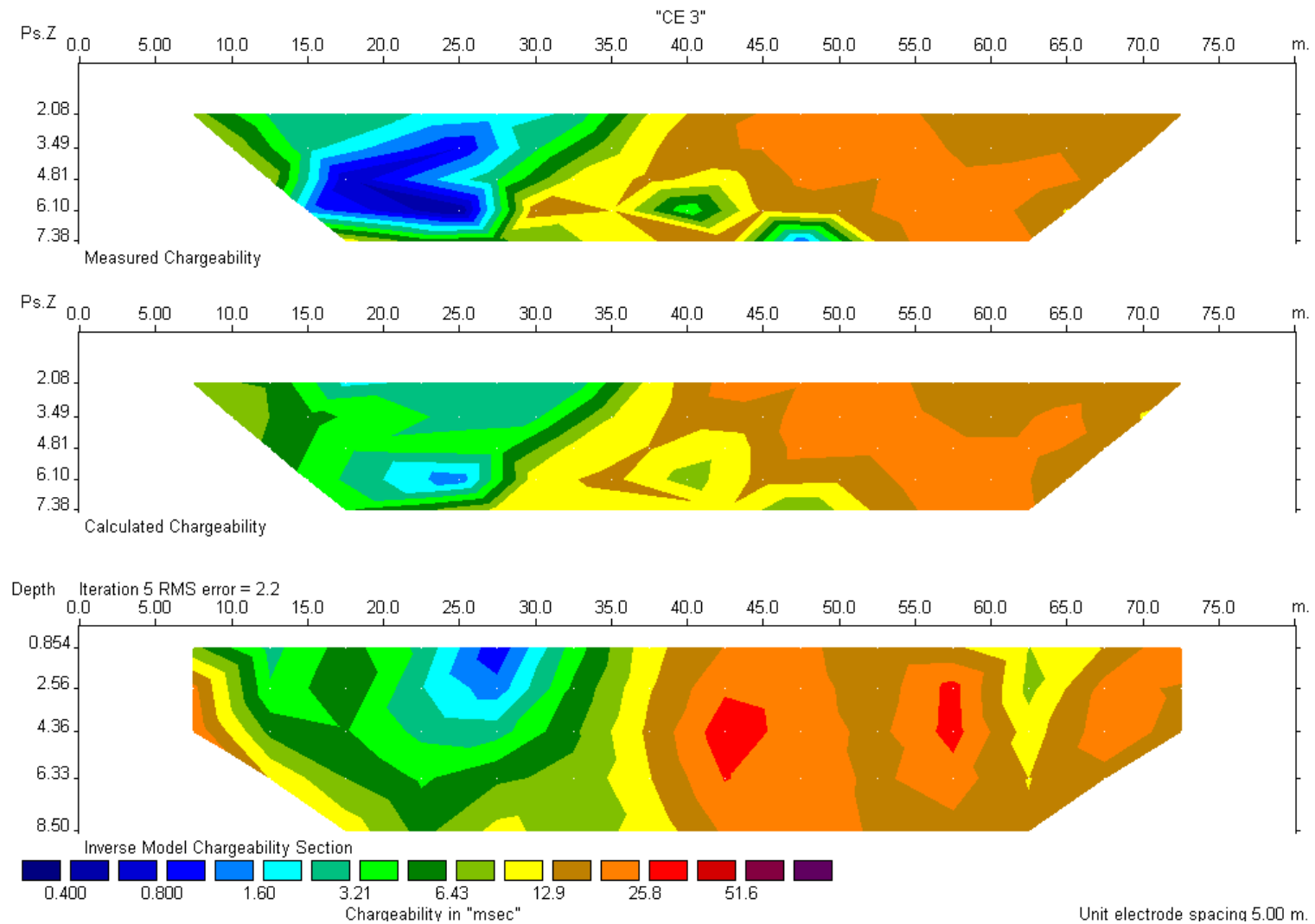


Figura I.6 – Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha CE 03.

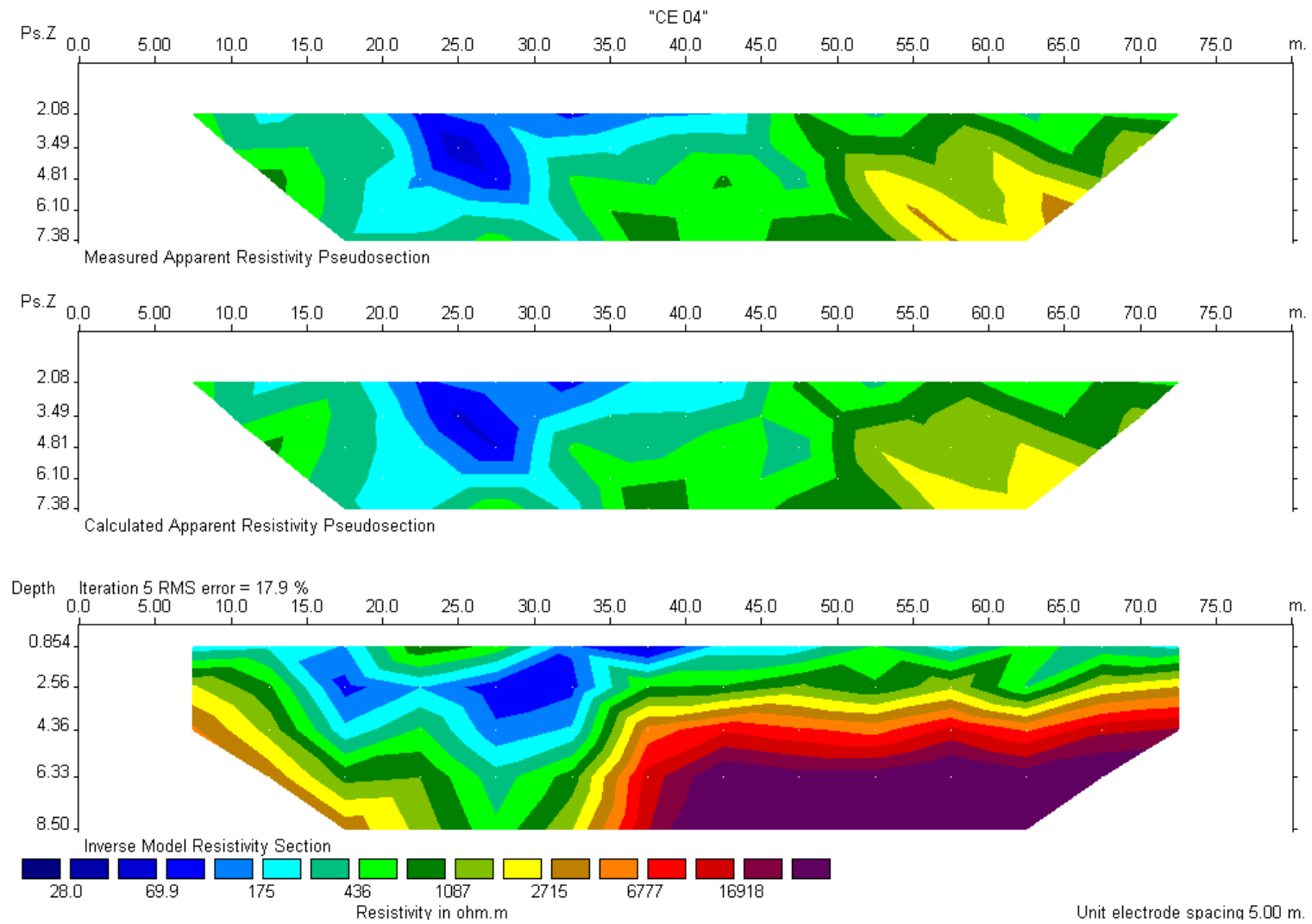


Figura I.7 – Inversão dos dados de resistividade aparente da linha CE 04.

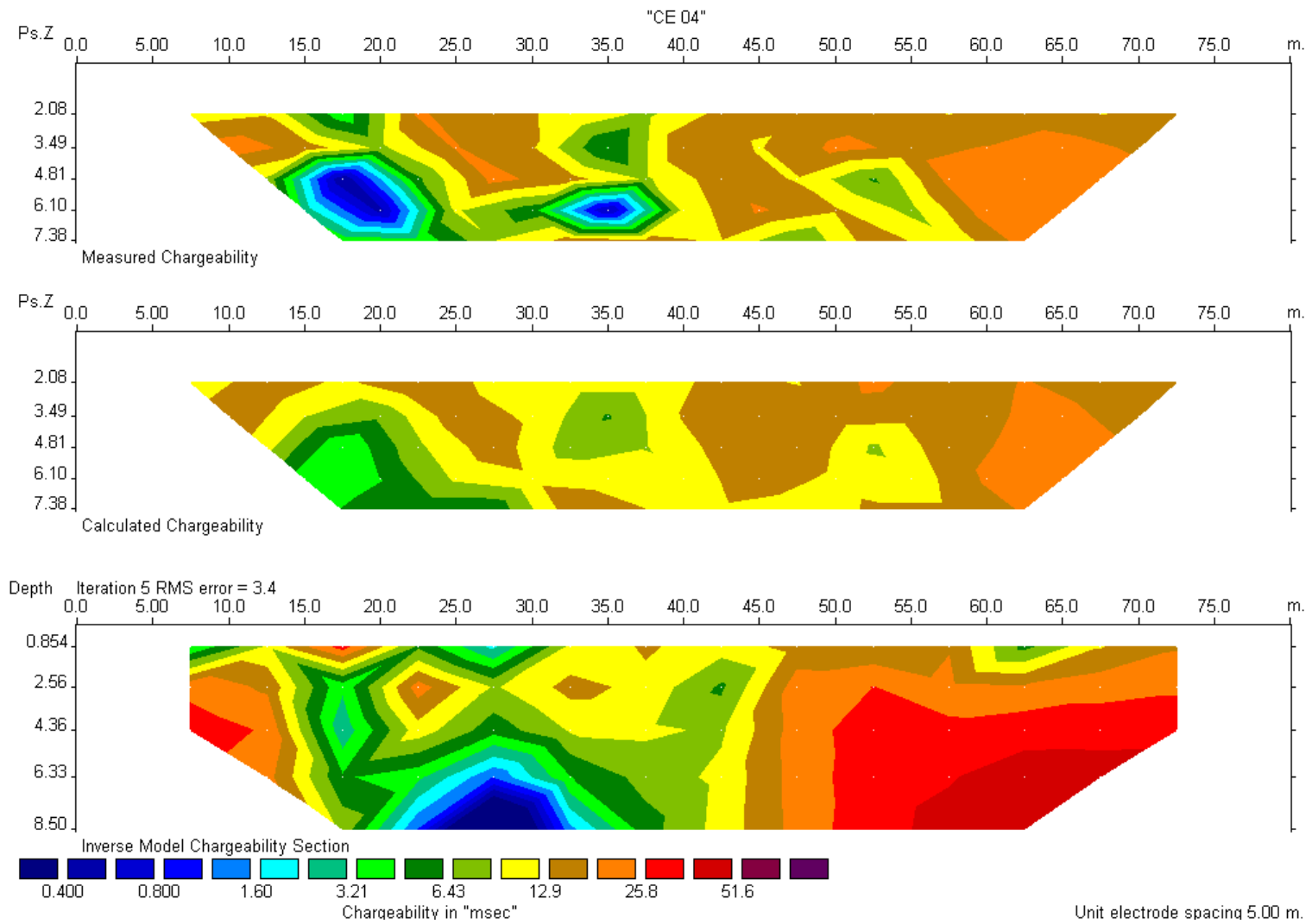


Figura I.8 – Inversão dos dados de cargabilidade aparente da linha CE 04.

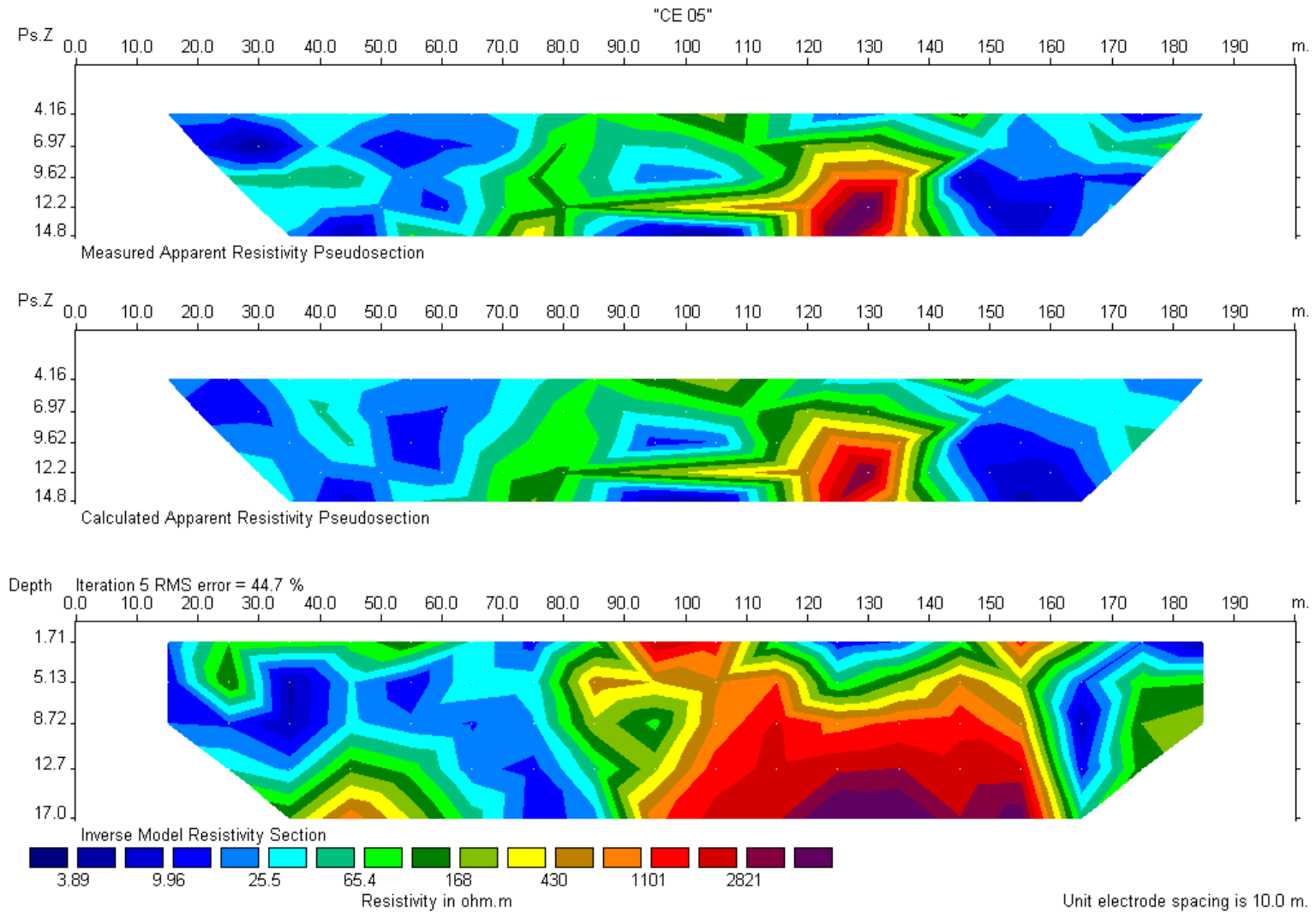


Figura I.9 – Inversão dos dados de resistividade aparente da linha CE 05.

ANEXO II

Boletins de Análise Bacteriológica



No. MS118/2008

BOLETIM DE ANÁLISE

Dados do Interessado:

Professor Dr. Vagner Elis – Fone: 11 3091-5034
CPF 63.025.530/0036-4
Rua do Matão – 1226 – Bairro Butantã
São Paulo – SP
CEP: 05508-090

Dados da amostra:

Produto: Solo
Período da coleta: não informada
Origem da amostra: não informado
Amostra(s) recebida(s) em: 17/11/2008
Amostra conservada sob refrigeração a 4°C até a realização das determinações.
Amostra(s) coletada(s): pelo interessado; procedimento não declarado.

RESULTADOS ANALÍTICOS

Identificação do usuário:		SD 01-1m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		305/08		
Parâmetro	Unidade⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 01-2m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		306/08		
Parâmetro	Unidade⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		28/11/2008

Identificação do usuário:		SD 01-3m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		307/08		
Parâmetro	Unidade⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 01-4m		Data do Ensaio
Identificação do laboratório:		308/08		
Parâmetro	Unidade⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		28/11/2008

1/5

Este boletim de análises só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.
Os resultados desta análise referem-se tão somente à amostra encaminhada.

Amel



No. MS118/2008

BOLETIM DE ANÁLISE

Identificação do usuário:		SD 02-1m		Data do Ensaio
Identificação do laboratório:		309/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 02-2m		Data do Ensaio
Identificação do laboratório:		310/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 02-3m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		311/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 02-4m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		312/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 03-1m		Data do Ensaio
Identificação do laboratório:		313/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	$3,85 \times 10^5$		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 03-2m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		314/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	$0,078 \times 10^5$		10/12/2008

2/5

Este boletim de análises só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.
Os resultados desta análise referem-se tão somente à amostra encaminhada.



No. MS118/2008

BOLETIM DE ANÁLISE

Identificação do usuário:		SD 03-3m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		315/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0,106 x 10 ⁵		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 03-4m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		316/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0,087 x 10 ⁵		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 04-1m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		317/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0,003 x 10 ⁵		28/11/2008

Identificação do usuário:		SD 04-2m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		318/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		28/11/2008

Identificação do usuário:		SD 04-3m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		319/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		28/11/2008

Identificação do usuário:		SD 04-4m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		320/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		28/11/2008

3/5

Este boletim de análises só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.
Os resultados desta análise referem-se tão somente à amostra encaminhada.

maria



No. MS118/2008

BOLETIM DE ANÁLISE

Identificação do usuário:		SD 05-1m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		321/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
Bactéria	UFC/g	0,113 x 10 ⁵		28/11/2008

Identificação do usuário:		SD 05-2m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		322/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
Bactéria	UFC/g	0,003 x 10 ⁵		28/11/2008

Identificação do usuário:		SD 05-3m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		323/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
Bactéria	UFC/g	0		28/11/2008

Identificação do usuário:		SD 05-4m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		324/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
Bactéria	UFC/g	0		28/11/2008

Identificação do usuário:		SD 06-1m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		325/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
Bactéria	UFC/g	0		28/11/2008

Identificação do usuário:		SD 06-2m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		326/08		
Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾			
Bactéria	UFC/g	0		10/12/2008

4/5

Este boletim de análises só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.
Os resultados desta análise referem-se tão somente à amostra encaminhada.

Amorim



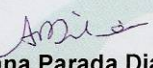
No. MS118/2008

BOLETIM DE ANÁLISE

Identificação do usuário:		SD 06-3m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		327/08		
Parâmetro	Unidade⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		10/12/2008

Identificação do usuário:		SD 06-4m		Data do ensaio
Identificação do laboratório:		328/08		
Parâmetro	Unidade⁽¹⁾			
<i>Bactéria</i>	UFC/g	0		28/11/2008

Campinas, 18 de dezembro de 2008.


Dra Adriana Parada Dias da Silveira
CREA 161323
IAC – CPD de Solos e Recursos Ambientais
Pesquisadora Científica

final do boletim

INSTITUTO AGRONÔMICO

5/5

Este boletim de análises só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.
Os resultados desta análise referem-se tão somente à amostra encaminhada.