UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Sorocaba

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em
Ciências Ambientais

WAGNER FRANÇA AQUINO

MÉTODO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA NA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA POR DIFERENTES FONTES

Sorocaba
2022

WAGNER FRANÇA AQUINO

MÉTODO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA NA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA POR DIFERENTES FONTES

Tese de doutoramento apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” na Área de Concentração: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sergio Tonello

Sorocaba

2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em ciências ambientais unesp Sorocaba

FICHA CATALOGRÁFICA

A657m

Aquino, Wagner França
Método geofísico de Resistividade Capacitiva na avaliação ambiental de contaminação subterrânea por diferentes fontes / Wagner França Aquino. -- Sorocaba, 2022
214 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Paulo Sergio Tonello

1. Diagnóstico Ambiental. 2. Resistividade Capacitiva. 3. Combustíveis. 4. Resíduos Domésticos. 5. Resíduos de Mineração. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MÉTODO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA NA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA POR DIFERENTES FONTES

AUTOR: WAGNER FRANÇA AQUINO
ORIENTADOR: PAULO SERGIO TONELLO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. PAULO SERGIO TONELLO (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciencia e Tecnologia UNESP Sorocaba

Prof. Dr. CESAR AUGUSTO MOREIRA (Participaçao Virtual)
Departamento de Geologia / UNESP - Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro (IGCE)

Prof. Dr. VAGNER ROBERTO ELIS (Participaçao Virtual)
Departamento de Geofísica / Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) - Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS CAVALLARO (Participaçao Virtual)
Engenharia Civil / Universidade Cidade de São Paulo (UNICID)

Dr. ERO HERMÍNIO CROZERA (Participaçao Virtual)
Profissional Autônomo

Sorocaba, 08 de setembro de 2022

DADOS CURRICULARES

1. IDENTIFICAÇÃO:

1.1. **Nome:** Wagner França Aquino
1.2. **Nascimento:** 16 de janeiro de 1963
1.3. **Nacionalidade:** Brasileira
1.4. **Naturalidade:** São Paulo – SP

Nome em citações bibliográficas: Aquino, W.F.; Aquino, W.; França Aquino, W.

2. FORMAÇÃO ACADÊMICA:

2.1. **Bacharelado em Geofísica (1989)**

- Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade São Paulo (IAG- USP);

- Bolsa Fapesp 87/1715-7, Projeto: Modelo preliminar da estrutura crustal com dados da Linha de Refração Caraíba-Sobradinho. Grupo de Sismologia do IAG- USP;
- Bolsa CNPq 804051/88.7-GL, Projeto: Compilação e elaboração dos perfis aeromagnéticos sobre as Geotransversais Brasileiras 1 e 2, e comparação dos sinais gravimétricos e magnetométricos. Grupo de Geofísica da Litosfera do IAG – USP.

2.2. **Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia (2000)**

- Instituto de Geociências da Universidade São Paulo (IGc-USP);
  Título: “Métodos geofísicos eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico da contaminação do solo e das águas subterrâneas em área de infiltração de resíduos industriais”.

3. ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE O DOUTORAMENTO:

3.1. AQUINO, W.F.; TONELLO P.S.; RESENDE, P.R. Experimentation and indirect methods applied to investigate the contaminated areas. **Revista de Gestão e Sustentabilidade (GEAS).** Edição especial, p.568-586, 2019. Disponível em https://doi.org/10.5585/GEAS.V8I3.15782

3.2. AQUINO, W.; CORRÊA, M., TONELLO P. Método de resistividade capacitiva e reclassificação dos métodos geoelétricos para estudos hidrogeológicos e de contaminação subterrânea. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 35, n.2, p.1-12. 2021. Disponível em https://doi.org/10.14295/ras.v35i3.30076

3.3. AQUINO, W.F.; CORRÊA, M.C.; BASTIANON, D. TONELLO P.S. Métodos da Geofísica Ambiental aplicados à investigação de contaminação subterrânea. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v.11, n.1. p. 74-97. 2021. Disponível em https://doi.org/10.29327/241867.11.1-5

3.4. AQUINO, W.F.; TONELLO P.S. Método de Resistividade Capacitiva para detecção de contaminação orgânica e inorgânica em área de manejo de resíduos domiciliares. **Revista Geociências Unesp**, v. 41, n. 1, p. 195-210, 2022. Disponível em https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i1.16284

Aos meus pais, Lúcia e Nei (*in memoriam*), pelo amor dedicado e por me transmitirem a importância dos estudos como forma de evolução, transformação e livre pensamento.

A todos os meus parentes, amigos e professores que partiram precocemente do nosso convívio numa época onde nunca fomos tão carentes da solidariedade e do saber.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, na pessoa do diretor do Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus Sorocaba, Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço e do vice-diretor Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais do ICTS, na pessoa do coordenador Prof. Dr. Admilson Irio Ribeiro, pela oportunidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Sergio Tonello pela retomada da amizade após mais de trinta anos e pela confiança, orientação, equilíbrio e motivação desde a entrada no programa de pós-graduação até o final desta jornada.

À minha esposa Valéria pelo apoio e incentivo ao não me deixar esquecer as motivações pessoais para a conclusão desse doutoramento.

Ao meu amigo Márcio Corrêa pelas discussões técnicas, pelo empenho na execução dos ensaios e pelo ceticismo que me obrigou conhecer cada vez mais a metodologia.

À minha irmã Simone pela ajuda na primeira publicação a partir desta tese e pelo aconselhamento crítico para aperfeiçoamento de partes deste trabalho e à minha irmã Elaine (*in memoriam*) pelo suporte e recepção quando da realização de trabalho de campo em disciplina no IAC de Jundiaí.

Aos técnicos Odair, Lênin e Rogério pelo auxílio de campo e pela perspicácia no olhar acurado ao verificar alterações quando alvos de interesse eram interceptados na aquisição de dados.

Aos professores Francisco e Assis por despertar o desejo adormecido de realizar este doutoramento e ao geofísico Adriano Seixas pela ajuda na elaboração dos mapas de resistividade elétrica.

Aos professores da UNESP pelo conhecimento transmitido nas disciplinas cursadas e aos funcionários do ICTS pelo apoio concedido para a execução deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa na etapa final esta pesquisa.

A todos os meus colegas do Programa Pós-graduação em Ciências Ambientais do ICTS, representados nos nomes de Regiane, Agna, Ocimar, Bruno e Marina, pelo companheirismo e pelos momentos agradáveis até quando foi possível estarmos semanalmente juntos.

“O homem sensato adapta-se ao mundo.
O homem insensato insiste em tentar adaptar o mundo a si.
Sendo assim, qualquer progresso depende do homem insensato.”
George Bernard Shaw

RESUMO

Este estudo teve como propósito apresentar e avaliar os resultados obtidos pela aplicação do método geofísico de Resistividade Capacitiva (RC), em especial pela técnica de imageamento elétrico, em diagnóstico ambiental de contaminação subterrânea decorrente de diferentes fontes, tais como área de transbordo de resíduos domiciliares com vazamento de combustível e pátio de beneficiamento mineral e que apresentam contaminantes de naturezas distintas. Dentro do escopo das Ciências Ambientais e de suas aplicações, esta pesquisa aborda uma avaliação detalhada do referido método na detecção de anomalias provenientes de combustíveis, resíduos domésticos e resíduos de mineração disseminados em subsuperfície, e contribui para uma melhor compreensão dos efeitos de suas presenças no ambiente em resposta a uma fonte capacitiva de corrente elétrica. Apesar de realizar medições de resistividade elétrica, o método de Resistividade Capacitiva é fundamentado em aspectos teóricos e práticos distintos da Eletrorresistividade galvânica, principalmente, quanto à forma de injeção da corrente elétrica em subsuperfície. Foram elaboradas análises comparativas dos resultados da Resistividade Capacitiva com os adquiridos pela aplicação dos métodos de *GPR* (*Ground Penetrating Radar*) e de Eletrorresistividade nas áreas investigadas e ensaios para avaliação da influência de determinados parâmetros de aquisição do método capacitivo na qualidade dos dados obtidos. É apresentada, também, uma nova classificação dos métodos geoelétricos em estudos hidrogeológicos e investigações ambientais com a inserção do método de Resistividade Capacitiva. Como resultado, foi verificado o grande potencial do método capacitivo na detecção e na distinção entre contaminação orgânica e inorgânica num mesmo ambiente em função da segregação dos diferentes valores anômalos, além da influência da resistividade elétrica natural (*background*) de diferentes litologias nos valores medidos para contaminantes orgânicos, e que não afeta as resistividades anômalas por compostos inorgânicos. Constatou-se os efeitos eletromagnéticos das menores resistividades elétricas do terreno na profundidade de alcance do método, as origens da interrupção da comunicação entre a transmissão e recepção do sinal elétrico pelas condições locais, além da relação entre a separação dos dipolos e o nível de investigação com determinação de uma razão ideal para incrementar a resolução dos dados. Pelos resultados obtidos nesta pesquisa, o método de Resistividade Capacitiva deve ser considerado como uma metodologia altamente recomendável em estudos de contaminação subterrânea e se junta a outros métodos geofísicos já consolidados neste tipo de aplicação.

Palavras chaves: Diagnóstico Ambiental. Resistividade Capacitiva. Combustíveis. Resíduos Domésticos. Resíduos de Mineração.

ABSTRACT

This study aimed to present and evaluate the results obtained by the application of the Capacitive Resistivity (RC) geophysical method, especially by the electrical imaging technique, in real cases of environmental diagnosis of underground contamination arising from different sources of contaminants, such storage area of domestic waste with fuel leak and mineral processing site. Within the scope of Environmental Sciences and their applications, this research approaches a detailed evaluation of the cited method in the detection of anomalies of organic and inorganic compounds, such as fuels, domestic and mining residues disseminated in the subsurface, and contributes to a better understanding of the effects of their presences in the environment in response to a capacitive source of electric current. Despite being a geophysical methodology that performs electrical resistivity measurements, Capacitive Resistivity method is based on practical and theoretical aspects different from the galvanic DC Resistivity, mainly regarding the way of injecting the electric current into the subsurface. In the investigated areas, comparative analyzes of the results obtained in a capacitive way with those acquired by the GPR (Ground Penetrating Radar) and DC Resistivity methods are also carried out. Furthermore, tests were performed with the capacitive method to evaluate the influence of certain acquisition parameters on the quality of the data obtained. A new classification of geoelectrical methods in hydrogeological and environmental studies is presented with the insertion of the Capacitive Resistivity method. As a result, the great potential of the capacitive method was verified in the detection and in the distinction between organic and inorganic contamination in the same environment due to the segregation of different anomalous values, in addition to the influence of the natural electrical resistivity (background) of different lithologies on the values measured for organic contaminants, and that does not affect the anomalous resistivities by inorganic compounds. It was verified the electromagnetic effects of the lowest electrical resistivities of the terrain in the depth of reach of the method, the origins of the interruption of communication between the transmission and reception of the electrical signal by the local conditions, in addition to the relationship between the separation of dipoles and the level of investigation with determination of an ideal reason to increase the resolution of the data. Based on the results obtained in this research, the Capacitive Resistivity method should be considered as a highly recommendable methodology in underground contamination studies and joins other geophysical methods already consolidated in this type of application.

Keywords: Environmental Diagnosis. Capacitive Resistivity. Fuels. Domestic Waste. Mining Residues.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Subdivisões dos campos da Geofísica Aplicada e Ambiental. 24
Figura 2 - Protótipo do Ohmmapper derivado do sistema VCHEP. 36
Figura 3 - Protótipo de sistema capacitiva de Grard & Tabbagh. 36
Figura 4 - Parâmetros principais para cálculo da resistividade elétrica. 48
Figura 5 - Relação da resistividade e a concentração de NaCl dissolvido. 51
Figura 6 - Eletrodo galvânico e cabos de medição de resistividade elétrica. 54
Figura 7 - Emissão de corrente elétrica num único ponto. 55
Figura 8 - Propagação de corrente e potencial elétrico em arranjo quadrupolo. 56
Figura 9 - Principais configurações de eletrodos da Eletrorresistividade. 58
Figura 10 - Emissão de corrente elétrica em meios de resistividades diferentes. 59
Figura 11 - Diagrama do arranjo dipolo-dipolo de caminhamento elétrico. 60
Figura 12 - Plotagem de dados do arranjo dipolo-dipolo da Eletrorresistividade.....61
Figura 13 - Sistema de placas capacitivas do equipamento modelo Corim. 63
Figura 14 – Sistema de eletrodos por antenas capacitivas do Ohmmapper. 64
Figura 15 - Modelo de eletrodo capacitivo de antena em linha do *Ohmmapper*. 64
Figura 16 - Detalhe do dipolo capacitivo do Ohmmapper. 65
Figura 17 - Correntes e potenciais elétricos nos dipolos do Ohmmapper. 66
Figura 18 - Acoplamento capacitivo de injeção de corrente elétrica. 67
Figura 19 - Modelo de eletrodo capacitivo e circuito elétrico equivalente. 68
Figura 20 - Equivalência entre arranjo dipolo-dipolo capacitivo e galvânico. 71
Figura 21 - Diagrama do sistema monorreceptor de Resistividade Capacitiva. 75
Figura 22 - Perfis de resistividade elétrica para diferentes profundidades. 76
Figura 23 - Montagem do eletrodo capacitivo do Ohmmapper. 78
Figura 24 - Diagrama de comprimentos e planilha do programa Magmap2000. 80
Figura 25 - Pontos de medidas em diferentes níveis para o Ohmmapper. 84
Figura 26 - Traço do sinal elétrico visualizado na tela do Ohmmapper. 85
Figura 27 – Pseudo-seção com diversas separações dos dipolos. 85
Figura 28 - Plotagem de medidas na pseudo-seção de Resistividade Capacitiva. ...86
Figura 29 - Plotagem incorreta de pontos de medidas para o Ohmmapper. 87
Figura 30 - Pseudo-seções de dados medidos e calculados e seção modelada. 89
Figura 31 - Conversão de dados de resistividade elétrica em pseudo-seção. 90
Figura 32 - Seção de resistividade elétrica e modelo de inversão. 91
Figura 33 - Localização da área de ensaios-teste. 92

Figura 34 - Geologia da região dos ensaios-teste. 93
Figura 35 – Feições geológicas identificadas em corte próximo ao condomínio. 94
Figura 36 - Diagrama para determinação de separação máxima dos dipolos. 95
Figura 37 - Localização das linhas para aferição de captação de sinal emitido. 96
Figura 38 - Perfil da linha A do teste de separação transmissor-receptor. 97
Figura 39 - Perfil da linha B do teste de separação transmissor-receptor. 97
Figura 40 - Diagrama com e sem recepção de sinal para o Ohmmapper. 99
Figura 41 - Linha teste para avaliação da representatividade das feições. 101
Figura 42 - Pseudo-seção de separações de 1,0; 5,0 e 10,0 m. 102
Figura 43 - Pseudo-seção de separações de 1,25; 2,5; 5,0 e 10,0 m. 102
Figura 44 - Pseudo-seção de separações de 2,5; 5,0; 10,0 e 12,0m. 103
Figura 45 - Pseudo-seção de separações de 1,25; 3,75; 7,0, 10,0 e 12,0 m. 103
Figura 46 - Pseudo-seção de todas as oito separações utilizadas. 103
Figura 47 - Linha teste de separações dos dipolos e linha GPR. 105
Figura 48 - Execução de perfil e cruzamento com tubulação conhecida. 106
Figura 49 - Seção para separações de cordas de 1,0; 3.75, 5,0 e 10,0 m. 108
Figura 50 - Seção para separações de cordas de 1,0; 5,0 e 10,0 m. 108
Figura 51 - Seção para separações de cordas de 1,25; 5,0 e 10,0 m. 108
Figura 52 - Seções de sequência binária de diferentes separações de cordas. 112
Figura 53 - Seção de separações de cordas de 3,75; 5,0 e 10,0 m. 113
Figura 54 - Foto do equipamento GPR Easy Locator Pro Widerange HDR. 115
Figura 55 - Seção de GPR com duto identificado (hipérbole de difração). 116
Figura 56 – Localização da área de transbordo de resíduos. 118
Figura 57 – Fases de compostos orgânicos LNAPL em subsuperfície. 119
Figura 58 – Escoamento de chorume no piso local. 120
Figura 59 – Localização da área de estudo no mapa geológico da RMSP. 120
Figura 60 – Perfis de sondagens executadas na área de transbordo. 121
Figura 61 - Mapa de isoconcentrações de benzeno e linhas geofísicas. 123
Figura 62 - Levantamento capacitivo na área de transbordo de resíduos. 124
Figura 63 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L01. 125
Figura 64 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L02. 125
Figura 65 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L03. 126
Figura 66 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L04. 126
Figura 67 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L05. 127
Figura 68 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L06. 127

Figura 69 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L07. 128
Figura 70 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L08. 128
Figura 71 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L09. 129
Figura 72 – Tampa de caixa subterrânea existente na área. 131
Figura 73 – Local de abastecimento, lubrificação e lavagem. 133
Figura 74 – Chorume observado sobre o piso da área de transbordo. 134
Figura 75 – Local externo de realização da linha capacitiva L09. 136
Figura 76 – Linha capacitiva executada entre caminhões de coleta. 137
Figura 77 - Anomalias de resistividades elétricas na zona saturada. 139
Figura 78 - Levantamento GPR na área de transbordo de resíduos. 140
Figura 79 – Seção GPR da Linha L01. 141
Figura 80 – Seção GPR da Linha L02. 142
Figura 81 – Seção GPR da Linha L03. 142
Figura 82 – Seção GPR da Linha L04 (background). 143
Figura 83 – Seção GPR da Linha L05. 143
Figura 84 – Seção GPR da Linha L06. 144
Figura 85 – Seção GPR da Linha L07. 144
Figura 86 – Localização da área de mineração investigada 148
Figura 87 – Geologia da área de estudo da mineração. 149
Figura 88 – Área de beneficiamento mineral investigada. 150
Figura 89 - Descrições de sondagens executadas na área de lixiviação. 151
Figura 90 - Localização dos perfis capacitivos e sondagens na área. 152
Figura 91 – Concentrações de sulfato (mg/kg) em diferentes profundidades. 153
Figura 92 - Medidas de urânio natural (Bq/kg) em diferentes profundidades. 154
Figura 93 - Imageamento capacitivo na área de beneficiamento de minério. 156
Figura 94 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 1. 157
Figura 95 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 2. 158
Figura 96 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 3. 158
Figura 97 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 4. 158
Figura 98 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 5. 159
Figura 99 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 6. 159
Figura 100 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 7. 159
Figura 101 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 8. 160
Figura 102 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 9. 160
Figura 103 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 10. 160

Figura 104 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 11. 161
Figura 105 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 12. 161
Figura 106 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 13. 161
Figura 107 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 14. 162
Figura 108 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 15. 162
Figura 109 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 16. 162
Figura 110 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 17. 163
Figura 111 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 18. 163
Figura 112 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 19. 163
Figura 113 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 20. 164
Figura 114 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 21. 164
Figura 115 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 22. 164
Figura 116 – Variação das dimensões das pilhas de rejeito. 168
Figura 117 - Mapa de resistividade capacitiva na profundidade de 3,0 m. 170
Figura 118 - Mapa de resistividade capacitiva na profundidade de 6,0 m. 171
Figura 119 - Mapa de resistividade capacitiva na profundidade de 9,0 m. 172
Figura 120 – Focos principais de sulfato e resistividades medidas. 174
Figura 121 - Focos principais de urânio e resistividades medidas. 175
Figura 122 – Eletrodos cravados no terreno em perfil de Eletrorresistividade. 177
Figura 123 - Posicionamento dos perfis de Eletrorresistividade na área. 178
Figura 124 - Resistivímetro modelo WDJD-4 fabricado pela BTSK. 179
Figura 125 - Exemplo de pseudo-seção de Eletrorresistividade: Linha C. 179
Figura 126 – Pseudo-seções 2 (capacitiva) e A (Eletrorresistividade). 180
Figura 127 - Pseudo-seções 4 (capacitiva) e B (Eletrorresistividade). 181
Figura 128 - Pseudo-seções 6 (capacitiva) e C (Eletrorresistividade). 181
Figura 129 - Pseudo-seções 9 (capacitiva) e D (Eletrorresistividade). 182
Figura 130 - Pseudo-seções 11 (capacitiva) e E (Eletrorresistividade). 182
Figura 131 - Pseudo-seções 13 (capacitiva) e F (Eletrorresistividade). 183
Figura 132 - Pseudo-seções 16 (capacitiva) e G (Eletrorresistividade). 183
Figura 133 - Pseudo-seções 18 (capacitiva) e H (Eletrorresistividade). 184
Figura 134 - Pseudo-seções 20 (capacitiva) e I (Eletrorresistividade). 184
Figura 135 - Resistividades elétricas obtidas na zona não saturada. 187
Figura 136 - Resistividades elétricas obtidas na zona saturada. 188
Figura 137 – Perfil de Resistividade Capacitiva com horários de aquisição. 189

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos métodos geoelétricos. 42
Quadro 2 – Reclassificação proposta dos métodos geoelétricos. 45
Quadro 3 - Faixas de resistividade elétrica dos materiais geológicos. 50
Quadro 4 - Especificações técnicas do resistivímetro Ohmmapper. 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistividades e condutividades elétricas de diferentes materiais. 53
Tabela 2 - Fator *n* e comprimento das cordas para dipolo de extensão 5,0 m. 82
Tabela 3 - Parâmetros comparativos dos diferentes conjuntos de cordas. 114
Tabela 4 - Medidas dos poços e concentração de benzeno (março/2018). 122
Tabela 5 - Resistividades das feições interpretadas na área de transbordo. 131
Tabela 6 - Resistividades elétricas limites do regime quasi-estático. 135
Tabela 7 – Características das anomalias de resistividades elétricas. 137
Tabela 8 - Trechos anômalos da contaminação na água subterrânea. 138
Tabela 9 - Posicionamento das anomalias de GPR na área de transbordo. 145
Tabela 10 - Comparação entre Resistividade Capacitiva e GPR. 147
Tabela 11 - Valores máximos para sulfato e urânio. 155
Tabela 12 - Resistividades das feições interpretadas do pátio de lixiviação. 166
Tabela 13 - Trechos anômalos e variação de resistividades das seções. 185
Tabela 14 - Comparação entre Resistividade Capacitiva e Eletrorresistividade. 190

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACs - Áreas contaminadas

ADs - Áreas degradadas

ASTM - American Society for Testing and Materials

CC - Corrente contínua

CE - Caminhamento elétrico

CEC - Caminhamento elétrico capacitivo

CEPAS - Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

EPA - Environmental Protection Agency

ER - Eletrorresistividade

FDEM - Eletromagnético no domínio da frequência

GAC - Gerenciamento de áreas contaminadas

GPR - Ground penetrating radar

ICTS - Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba

IE - Imageamento elétrico

IEC - Imageamento elétrico capacitivo

IP - Polarização induzida

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

IRC - Imageamento de resistividade capacitiva

K_{dd} - Fator geométrico do arranjo galvânico dipolo-dipolo

K_{LA} - Fator geométrico do arranjo capacitivo com antenas lineares

LNAPL - Light non aqueous phase liquid

LQ – Limite de quantificação

MASW - Método sísmico de análise multicanal de ondas superficiais

MKS – Sistema dimensional de comprimento, massa e tempo

OMS - Organização Mundial de Saúde

PVC - Policloreto de vinila

RC - Resistividade capacitiva

RMS - Root mean square

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

Rx - Receptor de sinal

SEV - Sondagem elétrica vertical

SP – Potencial espontâneo

Tx – Transmissor de sinal

TDEM - Eletromagnético no domínio do tempo

TDR - Reflectometria no domínio do tempo

TDS - Sólidos totais dissolvidos

TPH - Hidrocarbonetos totais de petróleo

UFMT - Universidade Federal do Mato Grosso

UFPR - Universidade Federal do Paraná

U-nat - Urânio natural

UNB - Universidade de Brasília

UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

USGS - United States Geological Survey

USP - Universidade de São Paulo

VCHEP - Sistema de resistividade capacitiva acoplada

VLF - Very low frequency

WARR - Wide angle reflection and refraction

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 18

1.1. ASPECTOS GERAIS 18

1.2. PREMISSAS E OBJETIVOS 21

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 23

2.1. GEOFÍSICA BÁSICA E APLICADA 23

2.2. HISTÓRICO DA GEOFÍSICA AMBIENTAL EM ESTUDOS DE CONTAMINAÇÃO 25

2.3. MÉTODOS GEOFÍSICOS NO DIAGNÓSTICO DE ÁREAS CONTAMINADAS 29

2.4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA 34

3. MATERIAIS E MÉTODOS 41

3.1. DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÕES DOS MÉTODOS UTILIZADOS 41

3.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS MATERIAIS GEOLÓGICOS E CONTAMINANTES 48

3.3. MÉTODOS GEOFÍSICOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA 53

3.4. MÉTODO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA (RC) 62

3.5. CONDIÇÕES PARA APLICABILIDADE DO MÉTODO DE RESISTIVIDADE CAPACITIVA 68

3.6. AQUISIÇÃO DE DADOS NO SISTEMA OHMMAPPER 73

- **3.6.1. Separações entre dipolos e o fator de proporcionalidade *n*** 79
- **3.6.2. Plotagem das medidas de Resistividade Capacitiva** 83

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 91

4.1. PRIMEIRO ENSAIO: DISTÂNCIA MÁXIMA DE CAPTAÇÃO DO SINAL EMITIDO 94

4.2. SEGUNDO ENSAIO: AUSÊNCIA DE RECEPÇÃO DO SINAL ELÉTRICO EMITIDO 99

4.3. TERCEIRO ENSAIO: NÚMERO DE PERFIS E REPRESENTATIVIDADE DAS FEIÇÕES 101

4.4. QUARTO ENSAIO: SEPARAÇÕES DOS DIPOLOS E RESOLUÇÃO DOS DADOS 105

4.5. ESTUDO DE CASO: CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA ORGÂNICA E INORGÂNICA 117

4.6. ESTUDO DE CASO: ÁREA DE MINERAÇÃO 147

- **4.6.1. Seções de imageamento de Resistividade Capacitiva** 156
- **4.6.2. Mapas de resistividade elétrica em corte de profundidade** 169
- **4.6.3. Dados comparativos de resistividade elétrica** 176

5. DISCUSSÕES FINAIS 191

6. CONCLUSÕES 197

7. REFERÊNCIAS 200

APÊNDICE 213

1. INTRODUÇÃO

1.1. Aspectos Gerais

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2007), a tendência de crescimento de impactos causados pelo gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos ou efluentes oriundos do processo industrial ganha destaque como um grave problema contemporâneo, o que gera diretamente efeitos danosos significativos, tanto ambientais, quanto na saúde da população, principalmente, por comprometer a qualidade do solo, da água e do ar, e por serem fontes de compostos orgânicos voláteis, pesticidas, solventes e metais pesados, entre outros, como apontado por Giusti (2009).

De acordo com Kist *et al.* (2018), problemas advindos da falta de controle de resíduos e efluentes relacionados à produção, armazenamento e destinação final, aliados à existência de uma legislação específica pouco rígida, propiciaram o emprego de ações nocivas, especificamente no que diz respeito à geração de contaminação dos solos e das águas subterrâneas, cujos estudos dos impactos ao ambiente e ao bem estar humano é de extrema importância às Ciências Ambientais.

Adicionalmente a esses procedimentos danosos, descartes clandestinos ou deposição inapropriada de resíduos à revelia das normas, leis e fiscalização das agências públicas de controle ambiental ainda continuam, situação também agravada pelo passivo ambiental estabelecido após a desativação de algumas plantas industriais e que, além dos riscos à população do entorno, demandam elevados recursos a serem despendidos na sua remediação (SALINAS, 2015).

Além dos aspectos mencionados, também é possível destacar os efeitos ambientais negativos que vazamentos em postos de serviço têm acarretado, conforme Lima, S.D. *et al.* (2017), e que resíduos na atividade agrícola podem ocasionar às áreas de plantação, como indicado por Souza *et al*. (2018), bem como a contaminação subterrânea causada pelo necrochorume por decomposição de corpos e de materiais enterrados em cemitérios, tema dos estudos de Pacheco (2012) e Silva, F.C. (2018).

Desta forma, a degradação da qualidade dos solos e da água subterrânea, seja decorrente da gestão inadequada em termos de armazenamento de resíduos ou produtos industrializados, seja a partir de descartes irregulares, torna-se uma questão de saúde pública, cujas consequências devem ser investigadas com intuito de avaliar a extensão e os impactos causados (OMS, 2007).

Em zonas urbanas das grandes metrópoles, onde é crescente a necessidade de reuso do solo para diferentes fins, os passivos ambientais ocasionados pelas contaminações subterrâneas geraram as denominadas “áreas contaminadas”, definidas pelo Decreto Estadual nº 59.263, de 05 de junho de 2013 como *“área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger”*, as quais atingiram um total de 6.434 casos no ano de 2020 segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

Quanto ao Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), as diretrizes que visam minimizar os riscos à população e ao meio ambiente são aperfeiçoadas ano após ano, fundamentadas no Estado de São Paulo a partir da Lei n. 13.577, publicada em 8 de julho de 2009, e que trata da proteção da qualidade do solo contra alterações nocivas por contaminação, da definição de responsabilidades, da identificação e do cadastramento de áreas contaminadas e da remediação dessas áreas de forma a tornar seguros seus usos atual e futuro.

Assim, em decorrência da necessidade de estudos detalhados para a caracterização e a determinação dos impactos causados por uma área suspeita ou comprovadamente contaminada, é cada vez crescente a aplicação de métodos geofísicos na investigação de contaminação do solo e água subterrânea. Seja pela demanda das indústrias ou das empresas de consultoria, como também por exigências das instituições de controle ambiental, a adoção de metodologias não invasivas nesses estudos se justifica pela eficiência e rapidez que apresentam para diagnosticar a existência de contaminantes em subsuperfície.

É de suma importância observar que, em muitos casos, os levantamentos geofísicos periódicos são a única forma de estabelecer a abrangência da

contaminação presente e o monitoramento de sua propagação, principalmente em áreas industriais abandonadas e que carecem de um controle ambiental sistemático, e onde a figura do agente poluidor, responsável pelo diagnóstico e remediação, é difícil de ser determinada (AQUINO, 2000).

Como define Blakstad (2014), uma pesquisa experimental é delineada com manipulação e testes controlados para compreender os processos causais, onde geralmente uma ou mais variáveis são manipuladas para determinar seu efeito sobre uma variável dependente.

Neste sentido, para a aplicação de novos métodos ou técnicas geofísicas de investigação ambiental, com viés na metodologia experimental para avaliação da contaminação do solo e das águas subterrâneas, é de fundamental importância a caracterização e correspondência da resposta do sinal geofísico obtido em relação às propriedades físicas do tipo de contaminante presente em subsuperfície.

Portanto, as atividades relacionadas à metodologia geofísica aplicada neste estudo são uma abordagem sistemática e científica de pesquisa (método experimental) onde são controladas uma ou mais variáveis (corrente elétrica), e medidas qualquer mudança em outras variáveis (potencial elétrico e resistividade elétrica), como forma de identificar alterações das propriedades elétricas de subsuperfície indicativas da presença de contaminantes de diferentes naturezas.

Diante do exposto, este estudo propõe utilizar o método geofísico aqui denominado de Resistividade Capacitiva (RC), através da técnica de imageamento de resistividade capacitiva (IRC), ou imageamento elétrico (IE), como metodologia de pesquisa experimental em diferentes locais como estratégia não invasiva no diagnóstico presuntivo da presença e abrangência de contaminação subterrânea orgânica ou inorgânica em áreas comprovadamente contaminadas, decorrentes do vazamento de combustível em planta de transbordo de resíduos domésticos e da lixiviação de pilhas de minério em pátio de beneficiamento.

Além disso, os resultados adquiridos pelo método capacitivo serão avaliados comparativamente aos obtidos pelos métodos geofísicos de *GPR* (*Ground Penetrating Radar*) e de Eletrorresistividade, também aplicados para diagnóstico ambiental dos referidos locais contaminados.

1.2. Premissas e Objetivos

Em relação à abordagem desta pesquisa e seus propósitos, procurar-se-á buscar as respostas que atendam os seguintes questionamentos quanto à metodologia a ser utilizada:

a) Como o método de Resistividade Capacitiva permite o reconhecimento de anomalias causadas por contaminantes orgânicos e inorgânicos e a distinção de seus efeitos por meio dos valores medidos de resistividade elétrica?

b) Quais os condicionantes geológicos que influenciam os valores anômalos medidos de resistividade elétrica?

c) Quais são os condicionantes antrópicos que podem prejudicar o levantamento de dados capacitivos ou interferir na qualidade dos dados obtidos?

d) Que fenômenos físicos podem prejudicar a transmissão da corrente elétrica de forma capacitiva no ambiente geológico?

Assim, o estudo aqui apresentado tem por finalidade como objetivo geral:

- avaliar a potencialidade de aplicação do método geofísico de Resistividade Capacitiva, pela técnica de imageamento elétrico, como metodologia de diagnóstico ambiental em casos reais de contaminação subterrânea por fontes distintas e onde estão presentes, comprovadamente, contaminantes de natureza orgânica, inorgânica e metálicos;

- analisar a aplicabilidade do método em questão em áreas contaminadas com diferentes condições de superfície, ambientes geológicos e formas de contaminação subterrânea e suas influências nas medidas das propriedades físicas dos contaminantes, em especial da resistividade elétrica;

- aferir as respostas da resistividade elétrica obtida de forma capacitiva quanto às diferentes concentrações dos contaminantes orgânicos, inorgânicos e metálicos, para, consequentemente, avaliar a capacidade da metodologia proposta na detecção desses compostos.

De forma mais específica, a presente pesquisa visa:

- estabelecer critérios de análise dos dados de Resistividade Capacitiva que permitam a distinção entre a contaminação de subsuperfície por composto inorgânico e orgânico, em função da correspondência ou não da relação da intensidade das anomalias de resistividade elétricas com as concentrações dos contaminantes presentes em subsuperfície;

- avaliar a influência do ambiente geológico no qual está localizado o contaminante na eficiência do método geofísico proposto, baseado nos comportamentos observados da resistividade elétrica medida e nos valores de resistividade elétrica natural do local (*background*) e se a metodologia proposta, portanto, poderia ser aplicada de melhor forma num determinado solo menos resistivo eletricamente ou num mais resistivo;

- desenvolver ensaios controlados, com o objetivo de determinar os parâmetros técnicos mais adequados para garantir a qualidade da aquisição de dados em termos de capacidade de identificação de contrastes nas medidas geofísicas, bem como atingir a melhor resolução possível para detalhamento das feições subterrâneas e quais as suas relações com a profundidade do alvo;

- avaliar as eventuais limitações do método proposto em relação às características das instalações locais e suscetibilidades às interferências externas (tipo de pavimento, rede elétrica aérea, objetos metálicos próximos, etc) e os procedimentos para minimizar essas influências;

- analisar comparativamente os resultados obtidos pelo método de Resistividade Capacitiva com os dados adquiridos pelo *GPR* e pela Eletrorresistividade galvânica nos mesmos locais contaminados;

- avaliar as potencialidades e limitações da Resistividade Capacitiva quando comparada ao método *GPR* na detecção de duto enterrado;

- apresentar uma proposta de reclassificação dos métodos geoelétricos devido à necessidade de inclusão do método de Resistividade Capacitiva aplicado nesta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Geofísica Básica e Aplicada

Segundo Parasnis (1997), a Geofísica pode ser definida como uma ciência diretamente ligada à Geologia e que estuda as estruturas ou corpos em subsuperfície identificados pelos contrastes de suas propriedades físicas com as do meio que os rodeiam, por intermédio de medidas aferidas na superfície terrestre, no interior de furos de sondagens e em levantamentos aéreos.

De acordo com este mesmo autor, os principais fenômenos físicos nos quais a Geofísica está baseada para determinar as propriedades físicas e investigar a constituição do interior da Terra são o campo magnético terrestre, o fluxo geotérmico, a propagação de ondas sísmicas, a força da gravidade, os campos elétricos e eletromagnéticos, as correntes telúricas e a radioatividade, sendo conhecida como Geofísica Básica (*Pure Geophysics*) ou Geofísica da Terra Sólida.

Esta área, muitas vezes, está associada aos estudos dos meios acadêmicos ou centros de pesquisa, com grande importância na compreensão de determinados fenômenos globais que podem interferir nas atividades humanas, como por exemplo as investigações relacionadas à previsão de terremotos (sismologia) ou à mudança temporal de polaridade do campo magnético terrestre (paleomagnetismo), atualmente num período de diminuição de intensidade (ZOSSI *et al.*, 2020) e que poderá, futuramente, afetar as comunicações, os transportes e a transmissão de dados.

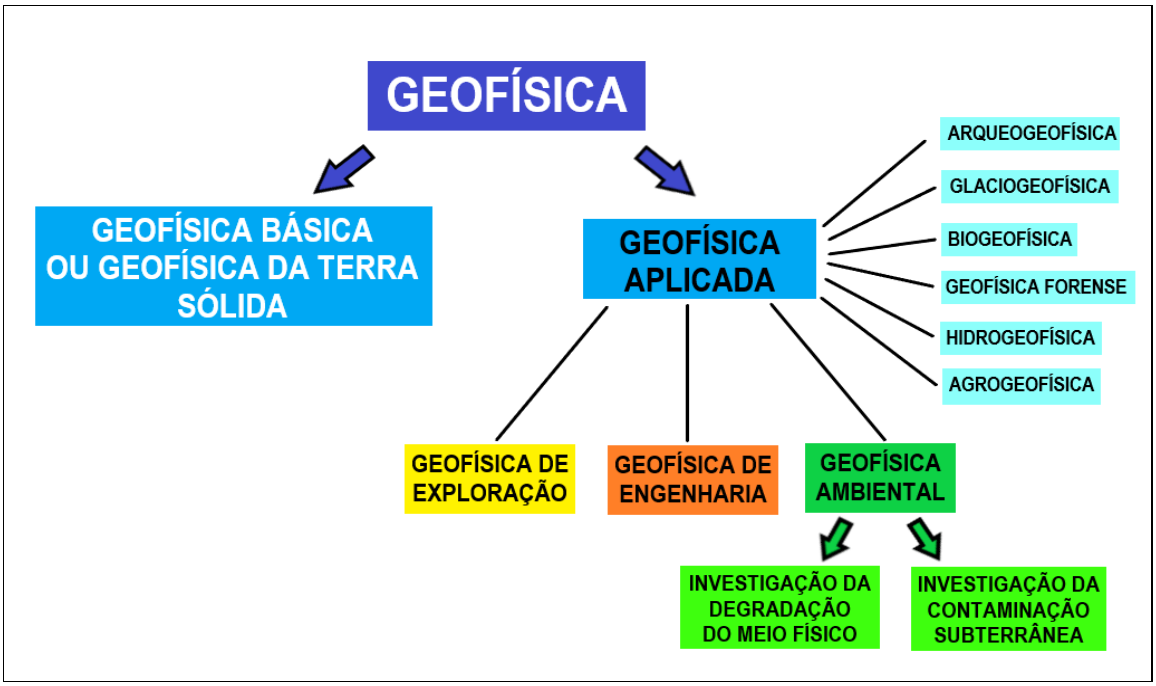
Por outro lado, Reynolds (2011) define a Geofísica Aplicada como a área da Geofísica que investiga os recursos minerais ou estruturas geológicas, relativamente pequenas e pouco profundas que possam estar presentes na crosta terrestre, como por exemplo a identificação de domos salinos, jazidas minerais, falhas e contatos geológicos, e que podem ter interesse nas aplicações de prospecção de petróleo, de localização de aquíferos, de exploração mineral e de engenharia civil, entre outras, e que também pode ser denominada por alguns autores como Geofísica de Exploração, como é caso de Kearey *et al.*, 2013.

Ao conceituar a Geofísica Básica e a Geofísica Aplicada, há uma diferenciação em relação ao *domínio teórico* para a primeira, através do desenvolvimento de teoria, de programas e de instrumentação, e ao *domínio prático* para a segunda, por meio da investigação de situações ou estruturas em porções geológicas rasas ou profundas (BRAGA, 2006).

Consideramos que esta divisão não faz sentido como forma de distinção de áreas da Geofísica, como por exemplo o estudo teórico da geração do campo geomagnético no núcleo externo da Terra e, como anteriormente descrito, as consequências práticas decorrentes de sua atenuação e deslocamento dos polos magnéticos, além dos estudos teóricos para desenvolvimento de programas e de equipamentos cada vez mais eficientes para a prospecção de petróleo em águas profundas.

Em função de objetivos econômicos específicos referentes à busca por recursos minerais, Reynolds (2011) insere a Geofísica de Exploração dentro do campo de atuação da Geofísica Aplicada, além de outros dois grupos maiores que são a Geofísica de Engenharia e a Geofísica Ambiental, com seis subáreas distintas conforme suas diversidades de utilizações, a saber, agrogeofísica, arqueogeofísica, biogeofísica, geofísica forense, glaciogeofísica e hidrogeofísica (Figura 1).

Figura 1 - Subdivisões dos campos da Geofísica Aplicada e Ambiental.



Fonte: Modificado de Reynolds, 2011.

De acordo com Greenhouse (1991) e Steeples (1991), Geofísica Ambiental é uma área da Geofísica voltada à avaliação dos efeitos danosos causados ao meio físico pela ação de determinados agentes em subsuperfície e a definem como a aplicação dos métodos geofísicos para investigações de fenômenos bio-físico-químicos rasos com implicações no gerenciamento ambiental de um local.

Desta maneira, esses autores estabelecem dois grandes campos de aplicação dos métodos geofísicos direcionados aos estudos de problemas ambientais:

I. um primeiro grupo referente ao diagnóstico dos impactos causados ao meio físico em eventos de degradação, tais como avaliação de processos erosivos e assoreamentos de corpos d´água, entre outros;

II. um segundo grupo associado à investigação de passivos ambientais provocados por contaminação subterrânea.

Quanto ao primeiro grupo de aplicação da Geofísica Ambiental, os levantamentos geofísicos podem ser implementados tanto sobre o solo, como sobre a água superficial, para avaliação dos efeitos da degradação que esses meios podem sofrer a partir dos eventos causadores.

Em relação ao segundo grupo, objeto deste trabalho, sua aplicação ambiental está direcionada à detecção de presença e mapeamento da contaminação em subsuperfície. Desta forma, há uma ênfase na investigação da existência de contaminantes no solo e nas águas subterrâneas, além de fornecerem informações importantes quanto às feições geológicas e hidrogeológicas dos locais afetados.

Neste contexto, a distinção desses dois grandes campos de aplicação da Geofísica Ambiental implica na sua utilização tanto para a avaliação dos impactos em locais que podem constituir áreas degradadas (ADs), bem como para contribuir ao diagnóstico dos passivos ambientais das áreas contaminadas (ACs).

2.2. Histórico da Geofísica Ambiental em estudos de contaminação

Segundo Parasnis (1997), os primeiros registros de aplicação de métodos geofísicos que trabalham com as propriedades elétricas (métodos geoelétricos) datam

de 1830 referentes aos estudos de Fox por meio do método de Potencial Espontâneo (*SP*) para prospecção de veios de enxofre em mina localizada na Cornuália, Inglaterra, com a aplicação de forma mais sistemática dos métodos de medição de resistividade elétrica apenas a partir da década de 1920, como apontado por este mesmo autor.

Posteriormente, de acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*EPA*, 1993), o uso dos métodos de Eletrorresistividade para investigações de qualidade das águas subterrâneas por corrente contínua foi iniciado nos anos 1930 pela primazia dos trabalhos de Swartz de 1937 e 1939 na execução de medidas de resistividade elétrica para identificar os efeitos causados por cunhas salinas em ilhas do Havaí (EUA), além do levantamento pioneiro de Sayre & Stephenson, também de 1937, para detecção de porções de água salgada presentes em subsuperfície em localidades no estado do Texas (EUA), cujos registros não são claros quanto à eventual contaminação ser de origem antrópica decorrente da extração de petróleo ou de origem natural.

Efetivamente, segundo a *EPA* (1993), os primeiros levantamentos com medições de resistividade elétrica para investigação de contaminação subterrânea de origem antrópica urbana são registrados para Cartwright & McComas que, em 1968, utilizaram a Eletrorresistividade para delimitar a abrangência de chorume a partir de aterro sanitário em Illinois (EUA), além do trabalho de Warner, de 1969, aplicado na identificação das alterações de baixas resistividades elétricas da água subterrânea provocadas por infiltração de esgoto a partir de estação de tratamento e de residências e, em outro caso avaliado, provenientes de vazamentos em cavas de disposição de salmoura da exploração de petróleo.

Posteriormente a esses levantamentos iniciais, conforme Greenhouse & Harris (1983), são relevantes tanto a aplicação de Hackbart (1971), que utilizou medidas de resistividade elétrica para avaliação da infiltração e monitoramento de contaminação subterrânea por cavas contendo enxofre, como o trabalho de Pliva & Wong (1975), que empregaram a Eletrorresistividade para avaliação de vazamento de depósito de armazenamento de sal para manutenção de estradas.

Deve ser citado também a importância do trabalho de Cartwright & Sherman (1972), cujas pesquisas definiram a potencialidade dos métodos de

Eletrorresistividade na detecção de contaminantes inorgânicos quando determinaram a relação inversa entre a quantidade de sólidos totais dissolvidos (*TDS*) na água subterrânea e a resistividade elétrica do terreno.

No entanto, de acordo com a *EPA* (1993), talvez uma dúzia ou pouco mais de artigos foram publicados na década de 1970 sobre o uso de métodos de resistividade elétrica para identificação de plumas subterrâneas de contaminantes e somente a partir dos anos de 1980 é que há um acréscimo na quantidade de literatura sobre o uso da Geofísica Aplicada para caracterizar e monitorar locais contaminados.

Segundo esta mesma agência, os métodos utilizados em medições de resistividade elétrica continuaram a ser os mais comumente usados para o estudo de água subterrânea até o início da década de 1980, quando os métodos Eletromagnéticos ganharam popularidade cada vez maior para investigações de Geofísica Rasa e que, por sua vez, também foram acompanhados, a partir dos anos de 1990, pelo emprego gradativamente maior da metodologia do *GPR* para avaliação de contaminação de subsuperfície.

Entre outras investigações realizadas entre as décadas de 1970 e 1980, destacamos aqui a importância do artigo de Greenhouse & Harris (1983), cujos levantamentos geofísicos de campo se iniciaram em 1975 para diagnóstico ambiental de antiga base da Força Aérea Canadense de Borden, Ontário (Canadá), concluídos em 1980 após diversas etapas e aplicação de variados métodos geofísicos.

Este trabalho de Greenhouse & Harris (1983), cuja relevância terá também influência no início das pesquisas geofísicas ambientais aqui no Brasil, é um marco fundamental dos pressupostos metodológicos, tanto teóricos, como práticos, da Geofísica Ambiental aplicada à investigação da contaminação subterrânea, com mérito de conjugar pela primeira vez o método de Eletrorresistividade, *Very Low Frequency* e Eletromagnético no Domínio da Frequência, estes dois últimos aplicados de forma pioneira na avaliação da presença de contaminantes em subsuperfície.

No Brasil, a aplicação da Geofísica Ambiental para estudos de contaminação subterrânea foi iniciada a partir da segunda metade da década de 1980 a partir de intercâmbio acadêmico entre a Universidade de Waterloo (Canadá), onde lecionava o Professor John Paul Greenhouse, já citado anteriormente, e o Centro de Pesquisas

de Águas Subterrâneas (CEPAS) da Universidade de São Paulo (USP), que tinha como um dos seus principais expoentes o Professor Aldo da Cunha Rebouças que já naquela época expressava grande preocupação com a preservação dos recursos hídricos subterrâneos, sendo tema principal de seu artigo elaborado para a Revista Águas Subterrâneas (REBOUÇAS, 1980).

A partir deste intercâmbio, foram iniciadas pesquisas de aplicação dos métodos geofísicos para a avaliação da qualidade do solo e da água subterrânea, com os trabalhos de Ellert *et al.* (1986, 1988) e de Mendes *et al*. (1987, 1989) que empregaram o método Eletromagnético Indutivo na avaliação dos impactos causados em subsuperfície por diferentes tipos de fontes de contaminação como aterros sanitários, cemitérios e outros locais com disposição inadequada de resíduos, alguns desses levantamentos combinados com medições de resistividade elétricas obtidas com o método de Eletrorresistividade.

Simultaneamente a esses trabalhos iniciais, José & Ellert (1989) também executaram levantamentos Eletromagnéticos Indutivos para a identificação da contaminação de lixiviados provenientes de aterro de resíduos domésticos, com correção dos dados medidos de condutividade elétrica em função dos efeitos provocados pela variação da profundidade do nível d´água relacionada aos desníveis topográficos.

A partir desses levantamentos iniciais e da continuidade de atuação desses primeiros autores, seguiram outros trabalhos científicos com o objetivo de se determinar a presença da contaminação por outras fontes, tais como os realizados por Costa & Ferlin (1993) utilizando o método Eletromagnético Indutivo e de Eletrorresistividade em área de disposição de lodo de curtume, e por Lima & Sato (1993) aplicando a Eletrorresistividade para avaliar a contaminação de aquíferos em polo petroquímico, os quais, também, foram sucedidos por diversos pesquisadores até o presente, que consolidou o emprego da Geofísica Ambiental neste campo de aplicação.

Neste contexto histórico, são destacados outros autores que contribuem de forma constante e sistemática na sua atuação profissional ou acadêmica em diversas instituições, casos da UNESP, USP, CETESB, IPT, UNB, UFMT, UFPR, em pesquisas

relacionadas ao tema específico de diagnóstico de contaminação subterrânea utilizando os métodos geofísicos de Eletrorresistividade, Eletromagnético Indutivo e *GPR*, cujos trabalhos relevantes, individuais ou em conjunto com outros colaboradores, devem ser citados, a saber: Elis & Zuquette (1996, 2002), Malagutti Filho *et al.* (2000), Aquino (2000), Dehaini (2001), Shiraiwa *et al.* (2002), Braga *&* Cardinalli (2005), Borges *et al.* (2006), Gallas *et al.* (2005), Moreira *et al.* (2007, 2019), Becegato *et al.* (2009) e Saraiva (2010).

É bem perceptível que nos últimos tempos há uma tendência crescente nas pesquisas de contaminação subterrânea para integração de dados pela combinação de diferentes métodos e técnicas geofísicas e para representação em três dimensões dos resultados obtidos como mostram os estudos de Ayolabi *et al.* (2013), Revil *et al.* (2013), Arato *et al.* (2014), Martorana *et al*. (2014), Helene *et al.* (2016), Oyinkuro *&* Wariebi (2017) e Cavallari *et al.* (2018).

2.3. Métodos geofísicos no diagnóstico de áreas contaminadas

Conforme Aquino *et al.* (2019), a aplicação dos métodos geofísicos na investigação de áreas contaminadas, ou suspeitas de apresentarem contaminação, consiste na avaliação das condições locais, tanto em relação à detecção de evidências da presença subterrânea dos contaminantes, bem como dos possíveis processos dinâmicos de migração no ambiente geológico, com vistas à localização, dimensão e sentido de fluxo dos contaminantes.

De maneira geral, os resultados de uma investigação geofísica no diagnóstico de contaminação subterrânea podem ser representados por gráficos, ou perfis, com a variação das medições das propriedades físicas de interesse num determinado comprimento (representação 1D), cortes verticais do subsolo com os valores obtidos e interpolados relacionados à amplitude das medidas ao longo de uma determinada distância e em profundidade (seções 2D), mapas de intensidade das leituras executadas numa determinada área (planta 2D), além de representações 3D do volume das anomalias. Tais representações possibilitam a elaboração de modelos virtuais e a determinação da existência, por exemplo, de tanques subterrâneos,

tambores enterrados, contaminações do solo e plumas da água subterrânea, cavas com resíduos e outras feições ambientais de interesse.

No Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001), a metodologia geofísica é apresentada em um capítulo exclusivo, classificada como métodos de "*screening*", isto é, métodos preliminares de varredura ou de rastreamento, que, quando aplicados ao diagnóstico ambiental da contaminação subterrânea, tem por objetivo fundamental a identificação da presença de contaminantes em subsuperfície, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

Decorrente da utilização cada vez mais frequente da Geofísica Ambiental na investigação de contaminação subterrânea, foi elaborada e publicada em 2011 a norma 15.935 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e que versa, de forma orientativa, sobre a seleção e aplicação ambiental dos métodos geofísicos de superfície e de poço(s), para a caracterização geológica e hidrogeológica do meio físico, detecção e/ou delimitação de contaminantes, detecção de resíduos e objetos enterrados, detecção de cavas e delimitação de aterros e lixões.

Além dessa norma brasileira, como referência aos estudos de contaminação subterrânea, merece destaque o conteúdo apresentado na norma D 6429-99 da *American Society for Testing and Materials* (*ASTM*) dos Estados Unidos, reeditada e aprovada em 2006, que inclui diversas outras normas inseridas em seu texto, com objetivo de orientar de maneira detalhada a seleção e utilização de métodos geofísicos de superfície aplicados em investigações geológicas, geotécnicas, hidrológicas e ambientais e o Guia da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*EPA*, 1993). Esta norma conceitua os métodos geofísicos, apresenta grande diversidade de referências sobre as diferentes metodologias de pesquisas geofísicas e descreve as potencialidades das técnicas geofísicas de aerolevantamentos, de superfície e de poços aplicadas aos locais contaminados.

Comparativamente aos métodos tradicionais de investigação de subsuperfície, tais como sondagens mecânicas por exemplo, uma das principais vantagens da aplicação da metodologia geofísica é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor, bem como propiciar a execução de perfis contínuos,

possibilitando a identificação com maior precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea (REYNOLDS, 2011).

Neste contexto, Kearey *et al.* (2013) afirmam que os métodos geofísicos permitem detectar e delinear características locais de interesse que não poderiam ser descobertas por nenhum conjunto realista de perfuração, e que, quando corretamente aplicados, contribuem para a maximização da taxa de cobertura de uma determinada área e para a minimização do número de sondagens requeridas.

Além da natureza da contaminação, as características do ambiente geológico podem condicionar o comportamento dos contaminantes em subsuperfície, ao passo que a interpretação dos dados geofísicos pode contribuir para a obtenção de informações sobre o tipo de solo ou rocha, 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, conforme Aquino *et al.* (2019), o emprego dos métodos geofísicos está voltado, especificamente, à localização de valas contendo resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de tambores e tanques enterrados, e determinação de vazamentos a partir de tanques ou dutos.

Segundo Greenhouse (1991), os fatores decisivos na seleção da metodologia geofísica a ser utilizada para detecção da contaminação são a natureza dos contaminantes, divididos entre compostos orgânicos e inorgânicos principalmente, o tipo de acondicionamento dos materiais enterrados (ex. tambores metálicos, recipientes plásticos ou nenhum), além das características do ambiente geológico e hidrogeologia locais, com aumento na precisão das interpretações quando aplicados dois ou mais métodos geofísicos distintos.

Em relação às medições geofísicas, os desvios significantes do padrão normal das medidas constituem as anomalias e, do ponto de vista ambiental, podem apontar a presença de contaminantes em subsuperfície, cuja interpretação é de fundamental importância na investigação de áreas contaminadas uma vez que suas intensidades

possuem uma relação direta com as concentrações da contaminação, além de serem úteis na orientação dos trabalhos subsequentes para monitoramento da propagação dos contaminantes e recuperação do local afetado (GRETSKY *et al.*, 1990).

Desta maneira, as informações obtidas a partir dos levantamentos geofísicos podem ser úteis na investigação de um local contaminado para reduzir o risco de perfuração de tanques e tambores enterrados com resíduos, ou de dutos e galerias subterrâneas, bem como para orientar a locação dos poços de monitoramento e também para fornecer estimativas de área e volume para as atividades de remoção e remediação de solos contaminados.

Portanto, quando existirem suspeitas ou mesmo evidências de presença de contaminantes em subsuperfície, os levantamentos geofísicos podem ser empregados na determinação de eventuais fontes primárias de contaminação subterrânea e/ou na detecção de possíveis fontes secundárias, sendo estas definidas da seguinte forma (CETESB, 2001):

- Fonte primária de contaminação: instalação ou material a partir dos quais os contaminantes se originam e foram, ou estão, sendo liberados para os meios impactados. Exemplo: valas com resíduos domésticos;

- Fonte secundária de contaminação: meio impactado por contaminantes provenientes da fonte primária, a partir do qual outros meios são impactados. Exemplo: solo contaminado por substâncias inorgânicas.

Decorrente disso, a aplicação dos métodos geofísicos pode ser efetuada nas diferentes etapas de atividades estabelecidas para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas (AQUINO *et al.*, 2019), com objetivos principais descritos da seguinte forma:

a) investigação preliminar - a metodologia geofísica pode ser utilizada para mapeamento das tubulações ou galerias subterrâneas na área suspeita (cadastramento de interferências) ou de estruturas remanescentes enterradas (levantamento histórico);
b) investigação confirmatória - os métodos geofísicos são utilizados para rastreamento (*screening*) e locação dos pontos de amostragem mais adequados,

através da determinação de anomalias que representem os pontos com maiores concentrações de contaminantes em profundidade (*hot spots*);

c) investigação detalhada e investigação para remediação - os métodos geofísicos podem ser empregados para o mapeamento da abrangência da contaminação e monitoramento de sua propagação subterrânea;

d) remediação das áreas contaminadas - esses métodos podem ser aplicados na avaliação da eficiência dos trabalhos de recuperação quando constatada a diminuição da intensidade das anomalias geofísicas apoiada nas reduções das concentrações dos contaminantes subterrâneos.

Conforme Nobes (1996), existe uma variedade de métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos ambientais, porém os principais e mais adequados à investigação da contaminação do solo e da água subterrânea são o método de Eletrorresistividade (ER), o Eletromagnético no Domínio da Frequência (*FDEM*) e o *GPR* (*Ground Penetrating Radar*) baseados nas variações e contrastes das propriedades elétricas dos contaminantes e do ambiente. Quanto à Resistividade Capacitiva em aplicação ambiental, seus resultados são promissores e permitem elencar este método junto aos demais citados.

Além desses, também é indicada por esse autor a importância do método Magnético (ou Magnetométrico) e que, diferentemente dos anteriores, é um método passivo por medir as alterações que materiais metálicos ferrosos enterrados causam no campo magnético natural da Terra, pouco usual no Brasil em aplicações de contaminação subterrânea, mas frequente na prospecção mineral.

A vantagem desses quatro métodos anteriormente citados em relação a outros métodos geofísicos consiste na capacidade de detecção da presença da contaminação subterrânea em si, representados por materiais ou substâncias exógenas em subsuperfície, e não apenas na identificação das feições geológicas das áreas em estudo (NOBES, 1996).

Portanto, é fundamental que haja correspondência entre a propriedade física de um determinado tipo de contaminante com a adequada metodologia a ser aplicada na investigação ambiental, ou seja, que permita a utilização de um método geofísico específico com capacidade de detecção das variações desta propriedade em suas medições, conforme definido por Parasnis (1997) como potencialidade.

O ambiente geológico exerce importante influencia na eficiência e na aplicabilidade dos métodos geofísicos para detecção de contaminantes subterrâneos e não deve ser negligenciável, como apontam Aquino *et al.* (2019). Porém, à luz das tecnologias atuais, existem formas de contornar tal problema, como por exemplo, através da aplicação de outro método que o inicialmente programado, da alteração de frequência de operação do equipamento geofísico, da mudança de técnica ou arranjo de levantamento de campo, entre outras adaptações.

Referente ao diagnóstico de contaminação subterrânea por compostos inorgânicos através de medidas resistividades elétricas, um dos temas centrais desta pesquisa, o emprego do método de Eletrorresistividade convencional (galvânica) tem apresentado os melhores resultados ao detectar baixos valores anômalos no ambiente geológico quando da presença de maiores concentrações deste tipo de líquido contaminante, conforme apontado nos trabalhos de Becegato *et al.*, 2009, Moreira *&* Braga, 2009, Gemail *et al.*, 2011 e Mepaiyeda *et al.*, 2019.

Em relação aos contaminantes orgânicos e sua identificação em subsuperfície por meio do uso da Eletrorresistividade, outro tópico de interesse, as pesquisas de Kress & Teeple (2005) e Oyinkuro *&* Wariebi (2017) apontam resistividades elétricas mais elevadas em eventos de contaminação relativamente mais recentes, do contrário, Cavallari *et al.* (2018) registram baixos valores de resistividade em pontos de maiores concentrações de combustível decorrente de alterações químicas provocadas no ambiente geológico, o que exemplificam a importância e a influência do tempo de residência desses compostos nos valores anômalos das medidas obtidas.

2.4. Desenvolvimento do método de Resistividade Capacitiva

De acordo com Hunter & Douma (2007), o desenvolvimento de forma mais efetiva do método de Resistividade Capacitiva ocorreu quando do interesse do Serviço Geológico do Canadá em investigar solos congelados (*permafrost*) entre o final dos anos 1980 e início dos anos 1990, por conta da dificuldade de utilização da Eletrorresistividade convencional com cravamentos de eletrodos e pela baixa resposta dos métodos Eletromagnéticos neste tipo de terreno.

Assim, conforme esses autores, o governo canadense firmou um acordo de cooperação científica com a antiga União Soviética para fins de intercâmbio de informações e pesquisas referentes às investigações nas zonas árticas no início dos anos 80, uma vez que os soviéticos já vinham implementando levantamentos geofísicos na Sibéria com um método denominado *VCHEP*, um acrônimo russo para "sistema de resistividade capacitiva acoplada", projetado e construído pelo Dr. Vladimir I. Timofeev como parte de seu doutorado do final nos anos 60 e aperfeiçoado, posteriormente, no Instituto de Hidrogeologia e Engenharia Geotécnica da Rússia, onde então trabalhava.

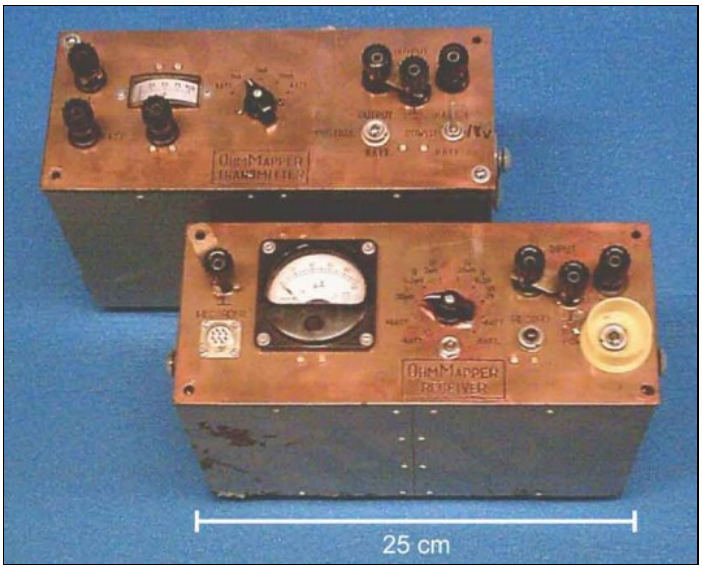
Na primavera de 1991, o grupo de pesquisa soviético realizou um levantamento por meio do sistema de resistividade capacitiva *VCHEP* no delta do Rio Mackenzie, no Oeste do ártico canadense, quando foram mapeadas grandes espessuras de gelo para avaliação das condições de sobrecarga às futuras rotas de gasodutos e oleodutos subterrâneos (*in* HUNTER & DOUMA, 2007).

Na sequência, os resultados desta pesquisa foram publicados em artigo de Timofeev et al. (1994), onde são apresentadas as bases teóricas para a aplicação do método de Resistividade Capacitiva e as comparações entre as medidas obtidas por este e pelos métodos de Eletrorresistividade galvânica e Eletromagnético no Domínio da Frequência (*FDEM*), bem como reportado outros dados relacionados aos levantamentos executados na Sibéria.

Ao longo desses anos iniciais, Timofeev desenvolveu vários refinamentos para este sistema de antenas capacitivas, que o tornaram mais robusto para diferentes aplicações, um desses modelos denominado de *Ruscan* como resultado do intercâmbio entre a Rússia e o Canadá, utilizado em conjunto com o *VCHEP* em outras regiões canadenses, como consta no artigo de 1994.

Naquela época, a empresa de instrumentos geofísicos Geometrics Inc. chegou a um acordo com Timofeev e começou a construir seu primeiro equipamento com base num protótipo analógico do *VCHEP*, denominado de *Ohmmapper* (Figura 2), e que, através do desenvolvimento de componentes eletrônicos de interface de alta tecnologia e de comunicações digitais ao longo dos anos, culmina no modelo atual utilizado nesta pesquisa.

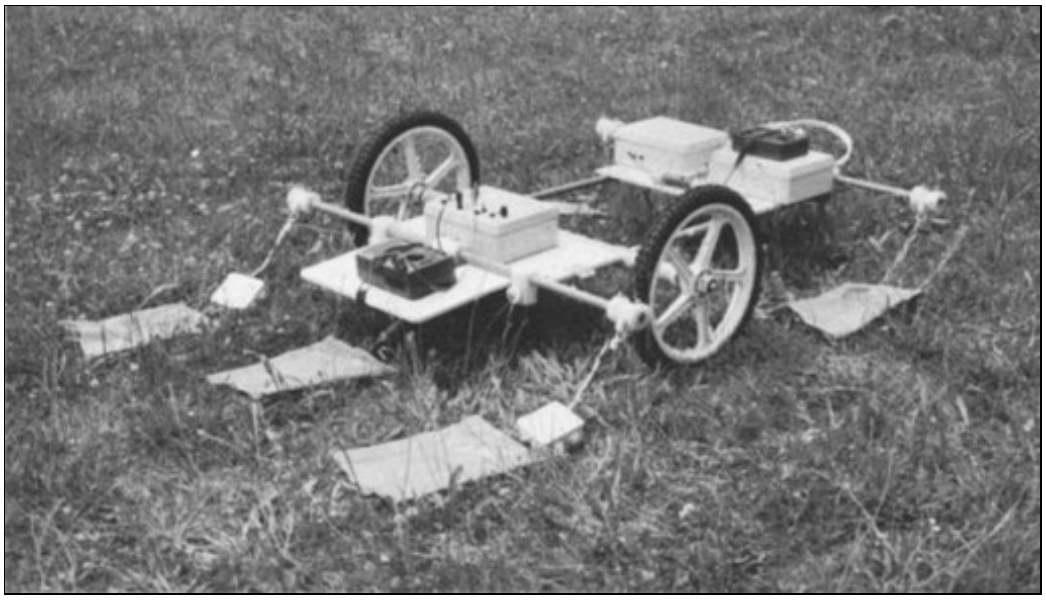
Figura 2 - Protótipo do Ohmmapper derivado do sistema VCHEP.



Fonte: *in* Hunter & Douma, 2007.

Paralelamente a esse desenvolvimento no início dos anos 90, outros pesquisadores também produziam diferentes protótipos de equipamentos capacitivos, como é o caso dos europeus Grard & Tabbagh (1991) que desenvolveram e testaram um instrumento que utilizava placas como eletrodos num arranjo quadrupolo (Figura 3), similar ao que viria a ser o sistema capacitivo Corim da fabricante francesa Iris Instrument.

Figura 3 - Protótipo de sistema capacitiva de Grard & Tabbagh.



Fonte: *in* Hunter & Douma, 2007.

Assim, a partir da metade dos anos 90, foram iniciados os levantamentos com o método de Resistividade Capacitiva de forma mais efetiva, com destaque para o trabalho de Shima *et al.* (1996) que utilizaram um equipamento muito parecido ao atual modelo *Ohmmapper* com multirreceptores, que consolida os fundamentos relacionados à aquisição de dados e emissão de corrente elétrica em subsuperfície por meio de eletrodos capacitivos.

Outro autor muito importante relacionado aos pressupostos teóricos e práticos sobre o método em questão é Oliver Kuras, dentre os trabalhos relevantes elaborados por este autor (KURAS 2002, 2006, 2007) é passível de destaque sua tese de doutoramento de 2002, cujo objetivo principal foi a construção para o Serviço Geológico Britânico de um equipamento de Resistividade Capacitiva baseado em placas como eletrodos, similar ao sistema de emissão de corrente elétrica e recepção de sinal do aparelho Corim da Iris Instruments.

Na tese de doutorado de Kuras (2002), são revistos de forma pormenorizada os pressupostos teóricos dos métodos, técnicas e arranjos da Eletrorresistividade galvânica e dos métodos Eletromagnéticos no domínio da frequência, os princípios de injeção de corrente elétrica no solo através de placas capacitivas e por meio de antenas capacitivas, além do registro de informações quanto à construção de um equipamento capacitivo de eletrodos de placas e dos testes de eficiência do protótipo manufaturado e os resultados obtidos.

Referente à instrumentação, também deve ser citado a tese de doutoramento de Adams (2008), que consistiu da apresentação detalhada dos princípios dos métodos Eletromagnéticos no domínio da frequência e sua relação com a emissão de corrente elétrica em subsuperfície, uma vez que tinha por finalidade primordial a montagem de um sistema de resistividade capacitiva com fonte indutiva de baixa frequência, distinto do manufaturado por Kuras em 2002.

Em relação aos artigos reportando as aplicações da metodologia de Resistividade Capacitiva nesta época, estes frequentemente focavam a avaliação geológica, geotécnica e ambiental em níveis mais rasos de profundidade, com outro método geofísico também sido aplicado no mesmo levantamento para comparação de resultados adquiridos.

Dez anos após as medições realizadas no delta do Rio Mackenzie por Timofeev com o equipamento *VCHEP*, Calvert (2002) realizou imageamentos com o equipamento *Ohmmapper TR1* neste mesmo local, cuja comparação apresentou uma boa correlação entre os dados adquiridos em épocas distintas.

Neste mesmo ano, Walker & Houser (2002) aplicaram o método de Resistividade Capacitiva para avaliação do teor de umidade em solo raso empregando diferentes configurações do *Ohmmapper* e compararam seus resultados com os obtidos também pela metodologia de reflectometria no domínio do tempo (método *TDR*).

Posteriormente, outros experimentos foram conduzidos por Yamashita *et al.* (2004) no Japão por meio da Resistividade Capacitiva, em conjunto com a Eletrorresistividade convencional, sobre solo coeso, em linhas paralelas sobre asfalto e grama para comparação dos resultados e ao longo de dique com cobertura asfáltica, com boa correspondência entre os valores de resistividade elétrica obtidos com esses dois métodos geofísicos.

Também deve ser citado o trabalho de Garman & Purcell (2004) ao empregar a metodologia capacitiva em áreas com nível d´água muito raso na Flórida (EUA) para avaliação geotécnica e identificação de zonas de argila, turfa e feições cársticas que pudessem impactar projetos de construção de rodovias e onde a Resistividade Capacitiva apresentou resultados melhores que o método de *GPR*, também utilizado.

Outro levantamento relacionado à aplicação da metodologia de Resistividade Capacitiva para investigação de condições geotécnicas é o trabalho de Asch *et al.* (2008), que utilizaram este método em conjugação com a Eletrorresistividade galvânica e o método Eletromagnético no domínio da frequência para avaliação de grande extensão de dique na cidade de Sacramento, Califórnia, para a detecção de zonas mais arenosas que poderiam apresentar potencial à erosão durante eventuais cheias, com resultados mais satisfatórios nas medidas de resistividade convencional e capacitiva.

Para avaliação das condições de dique no Japão quanto à possibilidade de infiltração e erosão, Hayashi *et al.* (2008) também aplicaram conjuntamente o método de Resistividade Capacitiva, de Eletrorresistividade galvânica e o método sísmico de

análise multicanal de ondas superficiais (*MASW)* para coleta de informações e estimativa da vulnerabilidade do material constituinte, com resultados positivos na aplicação dessas metodologias geofísicas.

Uma outra aplicação importante da Resistividade Capacitiva, combinada com outros métodos, é reportada no artigo de Nakazawa *et al.* (2012) cujo objetivo foi a definição de locais potenciais de liquefação do solo, provocadas por movimentos sísmicos, que poderiam gerar recalques diferenciais nas pistas dos Aeroportos de Tóquio e Matsuyama no Japão.

Além desse, é possível citar os trabalhos mais recentes de Inazaki *et al.* (2017) e Kisanuki *et al.* (2017) que, em áreas com riscos sísmicos no Japão, combinaram o método de Resistividade Capacitiva com os métodos de Eletrorresistividade, Sísmico e *GPR* para aplicações geotécnicas em investigações de locais com possibilidade de solapamentos ou para diagnósticos desses eventos quando ocorridos.

Em relação à aplicação ambiental do método de Resistividade Capacitiva, por ser uma metodologia com um desenvolvimento mais recente, um dos primeiros trabalhos foi o elaborado por Doll *et al.* (2001) que aplicaram esta metodologia com sucesso para identificar os limites laterais de aterro sanitário em Camp Roberts, Califónia, comparando esses resultados com os dos métodos de Eletrorresistividade, de Sísmica de Refração e Magnético.

Quanto à detecção de contaminação subterrânea mais especificamente, um dos principais trabalhos é o elaborado por Pellerin & Groom (2003) que utilizaram o *Ohmmapper* de quatro receptores para mapear de forma detalhada a contaminação decorrente de vazamentos de hidrocarbonetos de petróleo em antiga base militar nos Estados Unidos e cujos resultados, de forma não prevista por se tratar originalmente de substâncias de alta resistividade elétrica, apontaram a correlação das maiores concentrações desses compostos com os menores valores medidos de resistividade elétrica decorrente da provável permanência desses contaminantes orgânicos por décadas (30 a 40 anos) próximos à interface da zona não saturada e saturada.

Outro levantamento relevante de mapeamento de contaminação subterrânea por Resistividade Capacitiva, combinada à Eletrorresistividade convencional, deu origem ao relatório do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*USGS*), elaborado por

Kress & Teeple (2005) e que se refere ao diagnóstico ambiental de antigo complexo de tratamento de madeiras e de armazenamento de pentaclorofenol e creosoto em Houston, Texas, cujos resultados identificaram anomalias de maiores resistividades elétricas onde existiu no passado algumas das fontes potenciais da área investigada.

Por ser um método mais recente no Brasil, a bibliografia nacional dispõe de poucos exemplos de utilização da Resistividade Capacitiva, com destaque ao pioneirismo da dissertação de Cavenaghi (2017), que, através do emprego de um equipamento *Ohmmapper* de multirreceptores, a aplicou em sítio controlado no campus da Universidade de São Paulo (USP) com intuito de detecção de alvos subterrâneos com diferentes dimensões e constituídos por diversos tipos de materiais.

Deve ser citada, também, a tese de doutorado de Silva, F.C. (2018) pelo Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), que utilizou a Resistividade Capacitiva, em conjunto com os métodos geofísicos de Eletrorresistividade galvânica e Eletromagnético no Domínio da Frequência, como ferramenta fundamental para a locação de pontos de amostragens de solo na investigação confirmatória de contaminação por necrochorume em cemitério no município de Piedade (SP), cujos resultados evidenciaram as anomalias de menores resistividades elétricas nos pontos onde, posteriormente, foram determinadas as maiores concentrações de metais traços (bário, chumbo, cobalto, cobre, zinco, níquel e cromo).

Outro trabalho onde a metodologia capacitiva também foi empregada para avaliação de contaminação é o levantamento de Carmona et al. (2018) para identificação da presença de creosoto em área nas dependências internas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), localizado no campus da Universidade de São Paulo, e que aponta uma correspondência entre as maiores resistividade elétricas e os maiores valores determinados dos hidrocarbonetos totais de petróleo (*TPH*), que corroborou com os resultados obtidos com os do levantamento antecessor de Kress & Teeple (2005).

Mais recentemente, Lasmar (2020) empregou o método de Resistividade Capacitiva com a Eletrorresistividade (galvânica) e Polarização Induzida *(IP)* para a identificação de corpos de barita na região do Vale do Ribeira (SP), além da pesquisa

de Bicudo (2021) que aplicou o método capacitivo em 3D, integrado à Eletrorresistividade e GPR, no mesmo local contaminado por creosoto e investigado por Carmona *et al.* em 2018.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

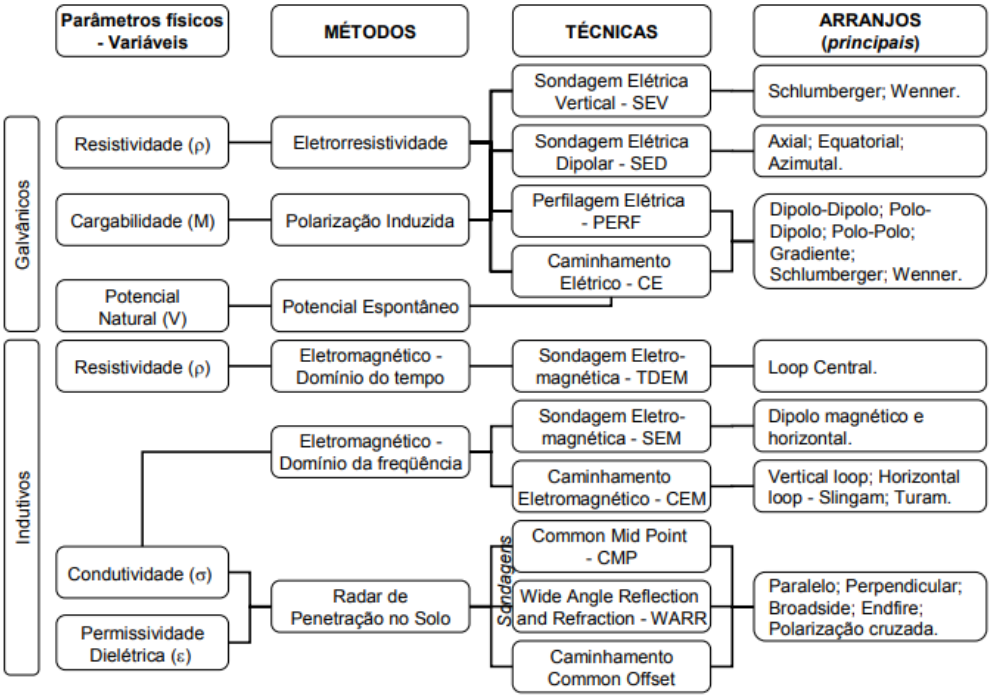
3.1. Definições e classificações dos métodos utilizados

Conforme definido por Reynolds (2011), os métodos geofísicos são metodologias indiretas de investigação subterrânea, a partir da aquisição de dados instrumentais em superfície, caracterizados como métodos não invasivos ou não destrutivos. Permitem avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das diferentes propriedades físicas dos materiais de subsuperfície, por exemplo condutividade ou resistividade elétrica, permissividade dielétrica, magnetismo, densidade etc., e que podem ter como origem as heterogeneidades litológicas e outras alterações naturais ou não.

Em termos de aplicação da Geofísica, uma questão importante surge quanto às diferentes terminologias relativas à definição conceitual de método, técnica e arranjo, cuja necessidade de uniformização foi abordada no importante trabalho de Braga (2006) e que propõe, especificamente, a classificação dos métodos geoelétricos aplicados aos estudos hidrogeológicos, como pode ser observada no Quadro 1, e que por muito tempo foi adotada para nortear os diversos trabalhos na área de aplicação dos métodos geofísicos para Geologia, Engenharia, Hidrogeologia, Meio Ambiente, entre outros.

A revisão a ser apresentada e discutida não pretende abordar os outros três grupos maiores, que são o método gravimétrico, o magnético e o sísmico, nem os métodos geofísicos com medições em poços.

Quadro 1 - Classificação dos métodos geoelétricos.



Fonte: Braga, 2006.

A despeito do mérito da classificação dos métodos geoelétricos apresentada por Braga (2006), esta necessita de revisões quanto a alguns conceitos para seu aperfeiçoamento, bem como demanda reenquadramentos para ser aberta às outras metodologias geofísicas em uso e à inclusão de novos métodos.

Inicialmente, quanto à subdivisão dos métodos geoelétricos apenas em galvânicos e indutivos indicadas na classificação anterior do Quadro 1, esta categorização é inadequada e requer alterações em virtude do surgimento nos últimos anos de métodos que combinam diferentes fontes de emissão do sinal geofísico. Um exemplo neste sentido é o sistema de resistividade elétrica de matriz capacitiva que é o tema desta pesquisa, mas também, como exemplo, do equipamento com fonte indutiva (eletromagnética) e um receptor capacitivo proposto no trabalho de Adams de 2008.

Além disso, devem ser formuladas revisões conceituais e reclassificações no estabelecido por Braga (2006), por exemplo, quanto ao método de *GPR*, ou Radar de Penetração no Solo, enquadrado no grupo maior de métodos geoelétricos e o inserindo ao subgrupo de métodos indutivos, indicação da condutividade elétrica (σ) e a permissividade dielétrica (ε) como parâmetros físicos medidos (variáveis).

Entretanto, diferentemente do que é indicado no Quadro 1 como parâmetros medidos, no método *GPR* são efetuadas, na realidade, medições dos tempos de reflexão do sinal em subsuperfície, isto porque na faixa de altas frequências de operação deste método, que pode variar de 10 a 2.500 MHz, a propagação da onda eletromagnética em profundidade é similar ao de uma onda elástica (sísmica), com refração e reflexão, como descrito no trabalho de referência elaborado por Davis & Annan (1989).

Outro aspecto que necessita de alteração nesta classificação é a adoção de apenas os parâmetros físicos medidos para individualização de um determinado método geoelétrico, como no quadro anterior. Porém, um dos mais importantes fatores definidores, e que não é considerado, corresponde ao tipo de fonte de emissão do sinal, isto porque a combinação desses dois fatores seria ideal para a distinção do método geofísico.

Esta questão será abordada mais a frente quando proposta a reclassificação e a diferenciação entre os métodos de Resistividade Capacitiva e de Eletrorresistividade, visto que ambos medem a mesma propriedade física que é a resistividade elétrica do terreno, embora com fontes e formas de emissão de corrente elétrica distintas.

Também passível de destaque na classificação de Braga (2006) é que esta, apesar de ser voltada aos métodos geoelétricos em aplicações hidrogeológicas, não inclui o método *VLF* (*Very Low Frequency*) na categoria de métodos Eletromagnéticos, e que é importantíssimo para a detecção de fraturas em rocha com finalidade de locação de pontos mais favoráveis à explotação de água subterrânea, como consta, por exemplo, do trabalho de Cordeiro & Marinho (2000), principalmente, em áreas onde o manto de intemperismo é pouco espesso.

Diante da necessidade de alterações na classificação aqui avaliada, pode ser citada, de maneira mais específica, a proposição referente à inserção da técnica de caminhamento para o método Eletromagnético no Domínio do Tempo (*TDEM*), além de mais arranjos de campo como consta no trabalho de Bortolozo (2011).

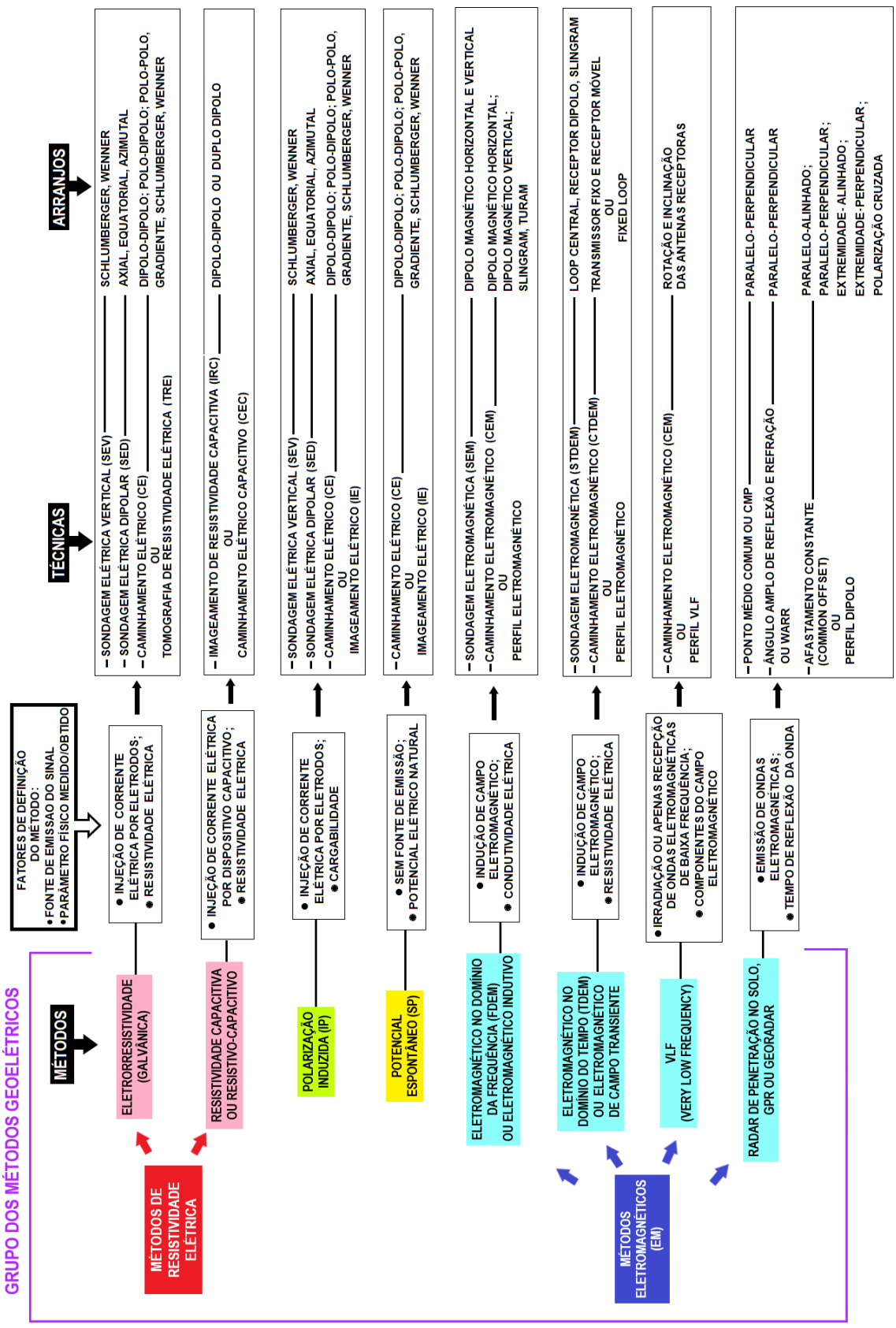
Baseado numa tendência cada vez maior, novos termos devem ser inseridos em função das denominações que surgiram nos últimos anos por conta da automatização, principalmente a dos levantamentos de Eletrorresistividade cujo emprego de diversos eletrodos simultaneamente (dispositivos multieletrodos), possibilitaram maior rapidez e resolução dos dados.

Como por exemplo os sinônimos cada vez mais utilizados na literatura nacional e pela comunidade geofísica internacional para a técnica de caminhamento elétrico que são tomografia de resistividade elétrica ou imageamento de subsuperfície (REYNOLDS, 2011), imageamento de resistividade 2D (GEMAIL *et al*., 2011), tomografia elétrica (KEAREY *et al*., 2013), imageamento elétrico (SILVA & MALAGUTTI FILHO, 2009) ou imageamento de resistividade elétrica (OSINOWO & FALUFOSI, 2018).

Além desses sinônimos para o termo caminhamento elétrico, há também a designação não tão usual de sondagem elétrica vertical multieletrodos (SEV-ME), que aparece de forma mais restrita em alguns memoriais técnicos descritivos para levantamentos em faixas de dutos ou refinarias de petróleo aqui no Brasil, citada somente para efeitos de informação, e aqui considerada não tão correta.

Decorrente das discussões anteriores, é apresentada no Quadro 2 uma proposição de reclassificação dos principais métodos geoelétricos, aplicados em superfície, tanto para estudos hidrogeológicos, como para diagnósticos da contaminação subterrânea, atualizada e mais abrangente ao proposto anteriormente por Braga (2006), respeitada as características individuais de determinados métodos geofísicos conforme seus fatores de definição e as possibilidades de surgimento futuro de fontes inovativas de emissão do sinal geofísico.

Quadro 2 – Reclassificação proposta dos métodos geoelétricos.



Fonte: Autoria própria.

Assim, aperfeiçoadas as definições da classificação proposta por Braga (2006) em relação às terminologias e suas distinções, a reclassificação sugerida nesta pesquisa considera os seguintes conceitos quanto à metodologia geofísica:

- Método: caracterizado pelos fatores de definição como função do parâmetro físico medido, ou obtido, e do tipo de fonte do sinal geofísico emitido, como exemplo: método de *GPR*, método Eletromagnético no Domínio da Frequência, método de Polarização Induzida (*IP*), etc;

- Técnica: tipo de investigação em campo para aplicação do método geofísico, com medição horizontal e/ou medição vertical das propriedades físicas de subsuperfície (ex. caminhamentos ou imageamentos, sondagens geofísicas, perfis);

- Arranjo: disposição dos emissores e receptores do sinal geofísico no terreno para o desenvolvimento da técnica em campo (ex. dipolo-dipolo, polarização cruzada, dipolo magnético vertical, etc).

De maneira geral, nesta reclassificação do Quadro 2, podem ser verificadas algumas modificações relativas à inclusão de mais métodos geofísicos, de técnicas e arranjos de campo, inserção dos fatores de definição do método, adoção de termos atualizados e traduzidos para o português, além de sinônimos para certas técnicas e arranjos comumente empregados, como também de ajustes conceituais e reposicionamentos.

Como exemplo de alteração, destacamos o reposicionamento dos métodos de Resistividade Elétrica como um subgrupo dos métodos geoelétricos, subdividido em método de Eletrorresistividade e método de Resistividade Capacitiva, o que possibilitou, portanto, a inclusão deste último nessa nova abordagem classificatória, um dos objetivos principais deste trabalho, e que na classificação original não seria possível.

Uma importante vantagem dessa nova forma de classificação, menos hermética que a anterior de Braga (2006), é que permite a inclusão de tecnologias combinativas, tais como o citado método proposto por Adams (2008) com fonte de emissão elétrica por indução de campo eletromagnético e um receptor capacitivo para obtenção da resistividade elétrica do terreno. Neste caso, quando os instrumentos

deste método estiverem concluídos e disponíveis, este poderia ser inserido nos métodos eletromagnéticos em função do tipo de emissão do sinal, e, decorrente de utilização de aparato capacitor como receptor, denominada de método Eletromagnético-Capacitivo, ou Indutivo-Capacitivo, por exemplo.

Quanto à designação do método de Eletrorresistividade nesta reclassificação, esta se refere ao método mais tradicional de injeção de corrente elétrica contínua por contato (galvânico), muito consolidado e que aparece em inúmeros artigos ou publicações especializadas da área, seja em Geofísica Aplicada, como também de Geofísica Ambiental, tais como os trabalhos de Elis & Zuquette (2002), Gallas *et al.* (2005) e Moreira *et al.* (2019), entre outros.

Portanto, como resultado das discussões anteriores, a metodologia geofísica de Resistividade Capacitiva nesta reclassificação passa a se diferenciar do método de Eletrorresistividade pelo tipo de fonte de emissão do sinal para subsuperfície, o primeiro, através de aparato capacitivo sobre a superfície do terreno e, o segundo, por meio de eletrodos cravados no solo.

Assim, de acordo com as argumentações aqui expressas, o método geofísico de Resistividade Capacitiva (RC) é classificado no grande grupo dos métodos geoelétricos, subgrupo de métodos de Resistividade Elétrica, categorizado como um método ativo ou dinâmico, por ter uma corrente elétrica controlada (artificial) como fonte do sinal para o interior do terreno.

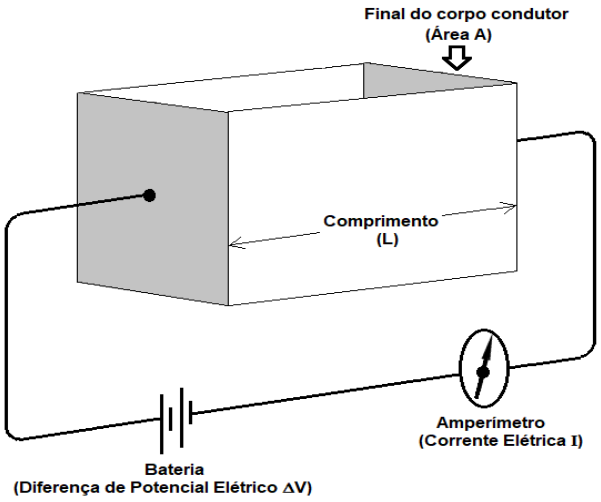
Referente à técnica de campo a ser aplicada na aquisição de dados pelo método de Resistividade Capacitiva, que consiste de medições horizontais com varredura lateral, esta será designada com o termo indicado por Kuras *et al.* (2007) e por Reynolds (2011) que é imageamento de resistividade capacitiva (IRC), do original *capacitive resistivity imaging*, e que, por analogia, poderia ser conhecida também por caminhamento capacitivo ou caminhamento elétrico capacitivo (CEC) de forma mais tradicional, ou ainda imageamento elétrico capacitivo (IEC) numa maneira mais contemporânea.

3.2. Resistividade elétrica dos materiais geológicos e contaminantes

Como já visto, o método de Resistividade Capacitiva trabalha com a resistividade elétrica dos materiais de superfície, sendo que, conceitualmente, esta propriedade física é a medida da dificuldade, ou facilidade, que uma corrente elétrica apresenta para atravessar um determinado corpo.

Portanto, conforme definem Iakubovskii & Liajov (1980), a resistividade elétrica (ρ) de qualquer material é determinada numericamente pela resistência obtida em um centímetro cúbico deste material, como resposta à corrente elétrica dirigida a uma de suas faces, como pode ser visto pelo esquema da Figura 4, elaborado por McNeill (1980).

Figura 4 - Parâmetros principais para cálculo da resistividade elétrica.



Fonte: McNeill, 1980.

Assim, a partir da Lei de Ohm, expressa por $R = \frac{\Delta V}{I}$, onde R é resistência do corpo (ohms), ΔV é a diferença do potencial elétrico (volts) e I é a corrente elétrica injetada (ampère), pode se calcular a resistividade elétrica (ρ), que é a propriedade de interesse aos métodos geofísicos, por meio das seguintes fórmulas (McNEILL, 1980):

$$\rho = \frac{R.A}{L} \quad \textbf{(3.1)} \quad \text{ou} \quad \rho = \frac{\Delta V}{I}.\frac{A}{L} \quad \textbf{(3.2),}$$

indicando, assim, a correlação da resistividade elétrica com a resistência (R), com a área de injeção (A) e com o comprimento do corpo (L).

Na exploração com métodos de Eletrorresistividade e de Resistividade Capacitiva, a resistividade elétrica (ρ) é medida em unidades de ohm por metro (ohm.m ou Ω.m) no sistema MKS, sendo que sua magnitude inversa, a condutividade elétrica (σ), tem dimensões de Siemens por metro (S/m ou mho/m).

De acordo com Iakubovskii & Liajov (1980), ao pressupor a rocha como um condutor elétrico deve ser considerada sua composição e, por ser um agregado, é representada pela matriz mineral sólida, por líquidos e por gases contidos em seus poros, onde sua resistividade elétrica influenciada pelos seguintes fatores:

a) resistividades dos minerais que formam a parte sólida da rocha (sua matriz);

b) resistividades dos líquidos e gases que preenchem os poros das rochas;

c) teor de umidade da rocha;

d) porosidade da rocha;

e) textura da rocha e forma de distribuição de seus poros;

f) processos de contato entre os líquidos nos poros e a matriz mineral.

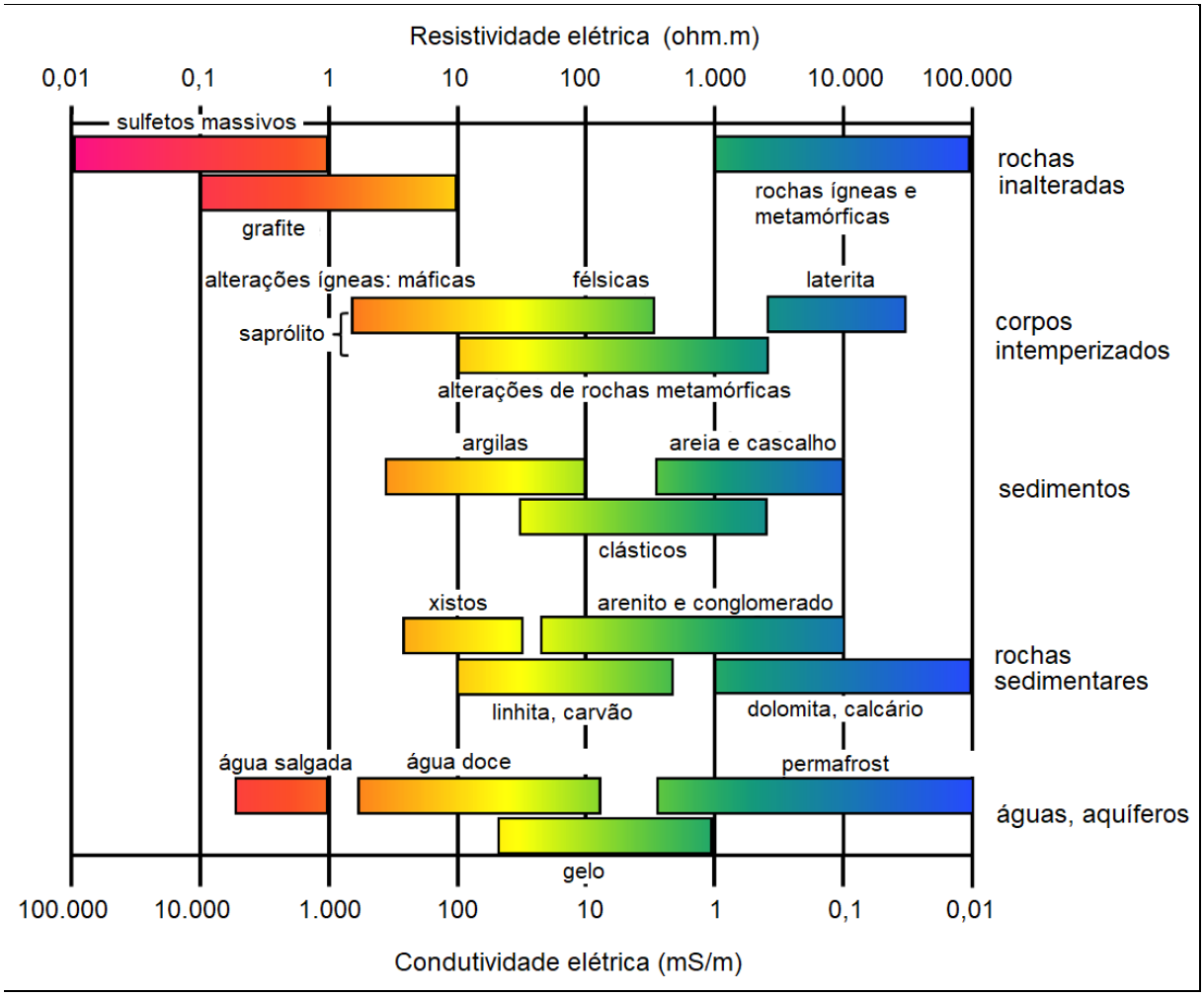
Portanto, de maneira geral, o comportamento elétrico das rochas depende do modo de agregação de seus minerais e da forma, do volume e do conteúdo dos poros (geralmente água ou ar).

Neste contexto, considerado apenas os minerais constituintes e da água pura, a resistividade elétrica das rochas deveria ser muito elevada, ou seja, praticamente isolantes elétricos, como exemplo, a alta resistividade apresentada pelos silicatos, que varia entre 10^6 a 10^{15} ohm.m e que é o grupo mineral de maior predominância da crosta terrestre (IAKUBOVSKII & LIAJOV, 1980).

No entanto, diante do fato que solos, sedimentos e rochas possuem poros e/ou fissuras em proporção maior ou menor, que podem estar ocupados total ou parcialmente por eletrólitos, esses materiais apresentam características de condutores iônicos, de resistividade elétrica (ou sua inversa condutividade) muito variável conforme o caso. Este padrão reflete os diferentes graus de saturação existentes em função de suas porosidades e/ou permeabilidades, como pode ser

observado no Quadro 3, o que permite a avaliação de forma indireta dos materiais geológicos através da aplicação dos métodos geofísicos de Resistividade Elétrica (PALACKI, 1988).

Quadro 3 - Faixas de resistividade elétrica dos materiais geológicos.



Fonte: Palacki, 1988.

Deste modo, em função das variações e da sobreposição de valores de resistividade elétrica para diferentes materiais geológicos que podem ser observadas no Quadro 3, onde é possível verificar que os valores expressos desta propriedade física não são absolutamente determinísticos para definir a litologia existente, daí a necessidade de outras informações prévias sobre determinado local a ser investigado para redução das ambiguidades na interpretação.

Como descrito anteriormente, é possível deduzir que as resistividades elétricas das rochas dependem, realmente, de diversos fatores e podem apresentar uma ampla gama de variação, como apresentado por Palacki (1988), sendo que na interpretação dos dados de resistividades dos materiais em profundidade, obtidas a partir da

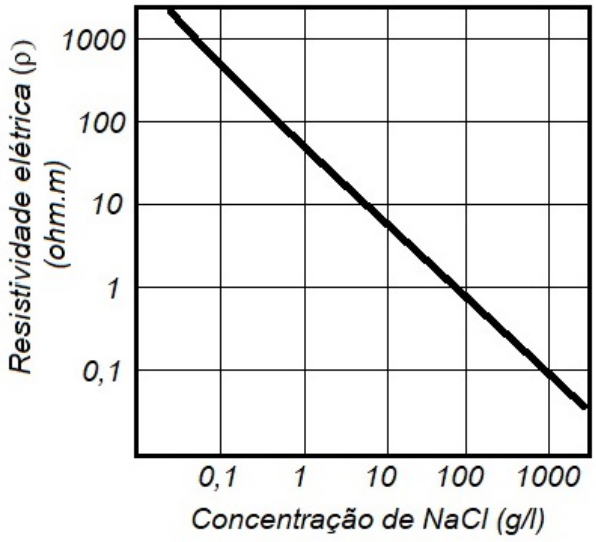
superfície do terreno, é fundamental, tanto a experiência do intérprete como o conhecimento geológico da área estudada, fatores que inviabilizam a direta associação (parâmetro físico-geológico) de forma puramente automática.

Apenas como comentário, deve ser salientado que na aplicação do método de Eletrorresistividade, como também de outros métodos geofísicos, são imprescindíveis todas as informações possíveis sobre a área alvo, principalmente, referentes às descrições geológicas do local.

De acordo com Iakubovskii & Liajov (1980), outro fato que implica na variação das resistividades elétricas dos materiais geológicos é que as águas presentes nos poros, nas fraturas ou na zona saturada, apresentam condutividade elétrica apreciável, pois sempre contêm algum tipo de íon dissolvido, cuja concentração e classe dependem dos solos e das rochas que as águas permearam em superfície ou em movimento subterrâneo, ou ainda do contato com gases durante a precipitação.

Importante destacar a influência da concentração de íons dissolvidos nos valores de resistividade elétrica da solução, como observado no gráfico a seguir (Figura 5) associado ao comportamento do cloreto de sódio (NaCl) dissolvido e que indica a relação inversa entre a concentração (g/l) e a resistividade elétrica, onde quanto maior a concentração iônica, menor será a resistividade elétrica medida (*in* IAKUBOVSKII & LIAJOV, 1980).

Figura 5 - Relação da resistividade e a concentração de NaCl dissolvido.



Fonte: *in* Iakubovskii & Liajov, 1980.

Desta maneira, é patente os efeitos dos íons dissolvidos na água subterrânea quanto à redução da resistividade elétrica em solo ou rocha, cuja detecção através do método de Resistividade Capacitiva é uma das proposições deste trabalho.

Mesmo íons naturais em concentração excessiva podem impactar a qualidade das águas subterrâneas, por exemplo decorrente de intrusões salinas em áreas litorâneas (NGUYEN *et al*., 2009) ou pela presença de fluoreto de origem magmática (HYPÓLITO *et al*., 2000), que por vezes prejudicam o consumo humano por alterar suas propriedades organolépticas (cor, olfato, sabor) ou exceder seus padrões de potabilidade.

Em relação aos metais de origem natural ou antrópica, que a depender dos teores podem constituir num grupo importante de potenciais contaminantes ao solo e à água subterrânea, esses possuem baixas resistividades elétricas, ou de maneira inversa altas condutividades eletrônicas, oscilando numa faixa de 10^{-8} a 10^{-6} ohm.m, como apontado por Iakubovskii & Liajov (1980).

De acordo com esses autores, a maioria dos minérios, decorrentes de suas condutâncias, pertencem ao grupo de semicondutores, classificados entre bons condutores com resistividade elétrica de 10^{-7} a 10^{-3} ohm.m, e os relativamente maus condutores na faixa de resistividade de 1 a 10^{3} ohm.m.

Na tabela apresentada na sequência (Tabela 1), conforme diversos autores (INOKUCHI & AKAMATU, 1961; BORNER *et al*., 1993 e LOKE, 2004), são apresentados os valores de resistividades e condutividades elétricas de alguns metais e de compostos inorgânicos, que são bons condutores de eletricidade devido as suas baixas resistividades, bem como de certas substâncias orgânicas classificadas como maus condutores por conta de suas altas resistividades. Em temos gerais, todos esses compostos são potenciais contaminantes ambientais, uma vez que são comumente encontrados nas análises químicas em eventos de contaminação do solo e água subterrânea por fontes de natureza diversa.

Tabela 1 - Resistividades e condutividades elétricas de diferentes materiais.

Material	Resistividade Elétrica (ohm.m)	Condutividade Elétrica (siemens/m)
Metais e Compostos Inorgânicos		
Ferro	$9{,}074\times10^{-8}$	$1{,}102\times10^{7}$
Chumbo	$2{,}2\times10^{-7}$	$4{,}54\times10^{6}$
Alumínio	$2{,}92\times10^{-8}$	$3{,}42\times10^{7}$
Cobre	$1{,}72\times10^{-8}$	$5{,}81\times10^{7}$
Níquel	$6{,}99\times10^{-8}$	$1{,}43\times10^{7}$
Cromo	$1{,}27\times10^{-7}$	$7{,}87\times10^{6}$
Manganês	$1{,}6\times10^{-3}$	625
Arsênio	$3{,}0\times10^{-7}$	$3{,}33\times10^{6}$
Mercúrio	$9{,}6\times10^{-7}$	$1{,}04\times10^{6}$
Cádmio	$6{,}8\times10^{-8}$	$1{,}47\times10^{7}$
Zinco	$5{,}9\times10^{-8}$	$1{,}69\times10^{7}$
Cloreto de Potássio (0,01 M)	0,708	1,413
Cloreto de Sódio (0,01 M)	0,843	1,185
Ácido Acético (0,01 M)	6,13	0,163
Compostos Orgânicos		
Gasolina (sem etanol)	$1{,}0\times10^{12}$	$1{,}0\times10^{-14}$
Xileno	$6{,}99\times10^{16}$	$1{,}43\times10^{-17}$
Tolueno	$2{,}0\times10^{11}$	$5{,}0\times10^{-12}$
Benzeno	$9{,}09\times10^{3}$	$1{,}1\times10^{-4}$
Hexano	$4{,}17\times10^{10}$	$2{,}4\times10^{-11}$
Diesel	$4{,}0\times10^{7}$	$2{,}5\times10^{-8}$
Naftaleno	$1{,}0\times10^{17}$	$1{,}0\times10^{-17}$
Antraceno	$1{,}3\times10^{12}$	$7{,}69\times10^{-13}$
Pireno	$5{,}0\times10^{15}$	$2{,}0\times10^{-16}$
Criseno	$4{,}0\times10^{17}$	$2{,}5\times10^{-18}$
Etanol	$1{,}0\times10^{6}$	$1{,}0\times10^{-5}$
Metanol	$2{,}63\times10^{3}$	$3{,}8\times10^{-4}$
Óleo cru	$1{,}76\times10^{7}$	$5{,}6\times10^{-8}$
Querosene	$5{,}88\times10^{5}$	$1{,}7\times10^{-6}$
Diclorometano	$9{,}09\times10^{2}$	$1{,}1\times10^{-3}$
Acetona	$5{,}0\times10^{5}$	$2{,}0\times10^{-6}$

Fonte: Adaptado de Inokuchi & Akamatu, 1961; Borner *et al.,* 1993 e Loke, 2004.

3.3. Métodos geofísicos de Resistividade Elétrica

Conforme apresentado anteriormente, os métodos de resistividade elétrica são aqueles que melhor respondem as variações das propriedades elétricas de solos e rochas e são baseados na injeção de corrente elétrica no terreno, na resistividade elétrica dos materiais de subsuperfície e nas diferenças de potencial elétrico (ddp) provocadas pelos dois primeiros elementos (REYNOLDS, 2011).

Em termos gerais, a resistividade elétrica (ou sua inversa, a condutividade elétrica) é a magnitude mais significante no estudo de propriedades elétricas dos solos e rochas ao possibilitar a obtenção de valores de resistividade das estruturas geológicas de subsuperfície (em unidades de ohm.m) a fim de estimar a litologia, a profundidade e a espessura das camadas, além de definir as conformações dos corpos geológicos ou das feições ambientais, como apontado por Parasnis (1997).

Primordialmente, é importante indicar que os métodos convencionais empregados para medições de resistividade elétrica dos materiais de subsuperfície necessitam de aparatos de contato galvânico para a injeção pontual de corrente elétrica em profundidade, que são denominados de eletrodos, os quais são hastes metálicas e que precisam ser cravados no terreno (aterramento) para emissão ou recepção do sinal elétrico, como pode ser visto na figura a seguir (Figura 6).

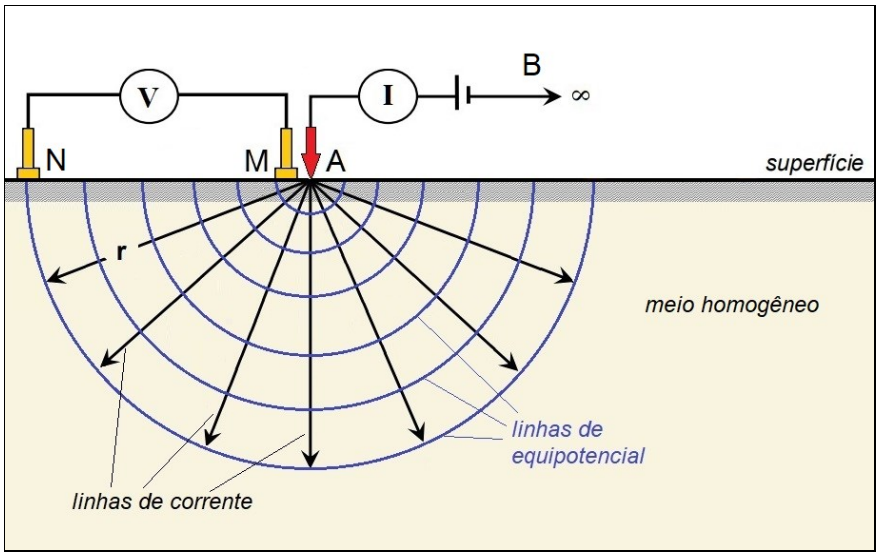
Figura 6 - Eletrodo galvânico e cabos de medição de resistividade elétrica.



Fonte: O autor.

Numa primeira abordagem teórica, a representação geométrica mais simples de medição de resistividade elétrica do terreno corresponde ao apresentado na Figura 7, que consiste na emissão de corrente elétrica a partir de apenas um ponto de injeção (monopolo) e medição de potencial num par de eletrodos (BRAGA, 2006).

Figura 7 - Emissão de corrente elétrica num único ponto.



Fonte: Adaptado de Braga, 2006.

O esquema da Figura 7 indica que o arranjo é caracterizado pela presunção de existência de um polo emissor de corrente elétrica (A) em contato com o terreno e de outro polo de corrente (B), teoricamente, posicionado em distância muito grande, portanto localizado num ponto no infinito (∞).

Decorrente da injeção de corrente elétrica num polo único no ambiente homogêneo considerado, a Figura 7 descreve que as linhas de propagação da corrente elétrica ocorrem de forma radial a partir do ponto de emissão, com linhas equipotenciais geradas em forma de semicírculos. Assim, de acordo com Reynolds (2011), a variação de tensão, desde um único eletrodo de corrente para alguns pontos no semiespaço, que representa o subsolo, é dada pela expressão:

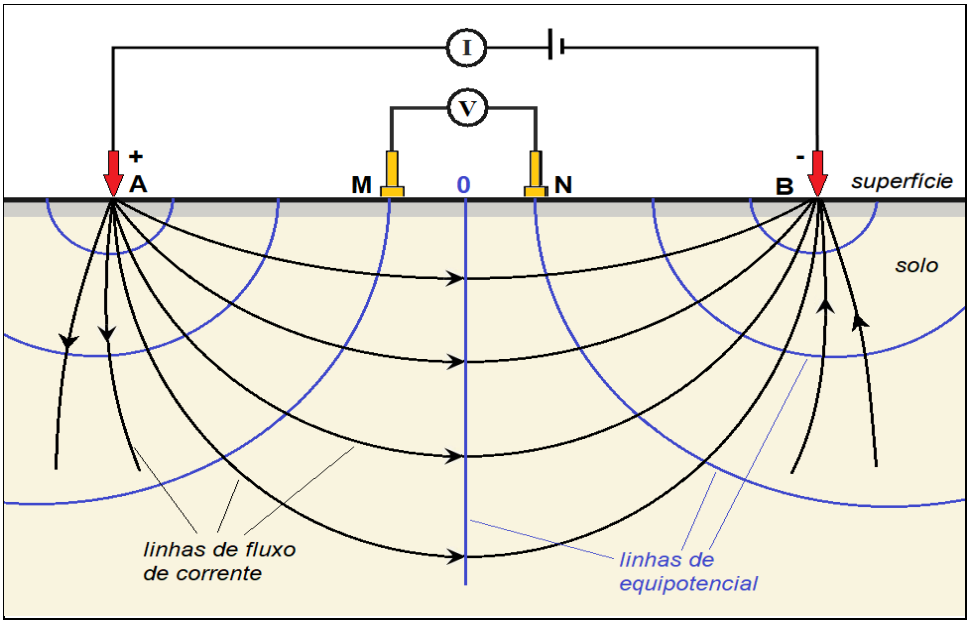
$$V = \frac{\rho\, I}{2\pi\, r} \qquad \textbf{(3.3)},$$

onde V é o potencial, I é a corrente, ρ é a resistividade do meio, e r é a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido. Deste modo, ao se observar a fórmula anterior (3.3), verifica-se que V, I e ρ são parâmetros físicos do método e o produto $2\pi.r$ é um parâmetro geométrico.

Segundo este autor, a realização deste arranjo na prática não é tão usual, em função da grande distância de separação entre os dois eletrodos de corrente elétrica, sendo necessária, assim, a redução das distâncias entre os quatros eletrodos

envolvidos no processo, o que implica na utilização mais comum de arranjos quadrupolos para a medição de resistividade elétrica (Figura 8), isto é, com dois dipolos de corrente (A e B) e dois de potencial (M e N). É importante enfatizar que os eletrodos de potencial devem obedecer a uma distância mínima entre si para poder medir os valores da diferença de potencial.

Figura 8 - Propagação de corrente e potencial elétrico em arranjo quadrupolo.



Fonte: Adaptado de Braga,2006.

Baseado na premissa que o ambiente avaliado é homogêneo e isotrópico, os potenciais elétricos medidos nos pontos onde estão localizados os eletrodos M e N são:

$$V_M = \frac{\rho\, I}{2\pi}\left(\frac{1}{\mathrm{AM}} - \frac{1}{\mathrm{BM}}\right) \quad \textbf{(3.4)} \quad \text{e} \quad \mathrm{V}_N = \frac{\rho\, I}{2\pi}\left(\frac{1}{\mathrm{AN}} - \frac{1}{\mathrm{BN}}\right) \quad \textbf{(3.5)}.$$

Desta maneira, a diferença de potencial a ser medida para determinada posição dos eletrodos M e N, será:

$$\Delta V_{MN} = V_M - \mathrm{V}_N \quad \textbf{(3.6)}.$$

Assim, após as devidas substituições, a diferença de potencial do arranjo quadrupolo da Figura 8 pode ser expressa através da seguinte equação:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\,\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{\mathrm{AM}} - \frac{1}{\mathrm{BM}} - \frac{1}{\mathrm{AN}} + \frac{1}{\mathrm{BN}}\right) \quad \textbf{(3.7)}.$$

Portanto, a resistividade do ambiente pode ser expressa por:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V_{MN}}{\left(\frac{1}{\mathrm{AM}} - \frac{1}{\mathrm{BM}} - \frac{1}{\mathrm{AN}} + \frac{1}{\mathrm{BN}}\right).I} \quad \textbf{(3.8)}.$$

O pressuposto até aqui é de existência um ambiente homogêneo onde, portanto, a resistividade elétrica de subsuperfície sempre será a mesma, o que implica que a resistividade calculada pela equação (3.8) deve ser constante e independente do espaçamento e posicionamento dos eletrodos em superfície.

Como em realidade o ambiente geológico é heterogêneo, a resistividade elétrica irá variar com as posições relativas dos eletrodos de acordo com Kearey *et al*. (2013), cujo valor medido é uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em subsuperfície, denominado de **resistividade aparente (ρ_a)**.

Deste modo, esta resistividade aparente é a variável obtida pela aplicação da maioria dos métodos geoelétricos, sendo que seus valores calculados fundamentam a interpretação final dos ensaios geofísicos de resistividade elétrica e são expressos em unidades de ohm.m de acordo com a seguinte equação genérica:

$$\rho_a = K.\frac{\Delta V}{I} \quad \textbf{(3.9)}.$$

Nesta equação, a grandeza K é o fator geométrico da relação de distância entre os dois eletrodos de corrente e os dois de potencial, onde, para o arranjo quadrupolo apresentado na Figura 8, seu valor é calculado por

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\mathrm{AM}} - \frac{1}{\mathrm{BM}} - \frac{1}{\mathrm{AN}} + \frac{1}{\mathrm{BN}}\right)} \quad \textbf{(3.10)},$$

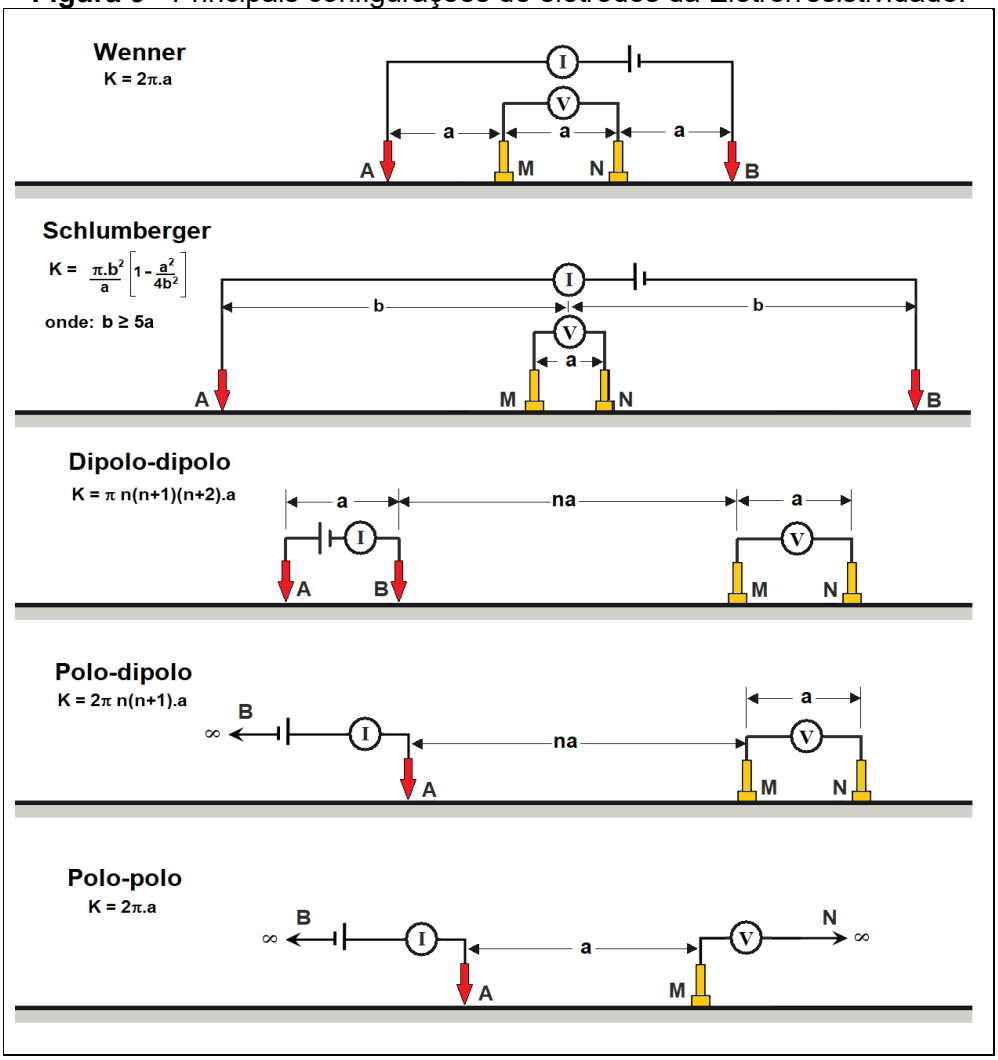
e variará conforme o arranjo adotado e, consequentemente, de acordo aos posicionamentos dos eletrodos, como indicado por Reynolds (2011).

Portanto, de forma conceitual, o fator geométrico K, calculado pela equação (3.10), é um elemento de correção das resistividades elétricas em função das reduções de intensidades que sofrem a corrente elétrica emitida e o potencial elétrico medido quando a separação entre o ponto de injeção do sinal e o local de medição gradativamente vai aumentando.

Neste contexto, deve ser citado que existem vários tipos de arranjo de disposição dos eletrodos sobre o terreno em medições com o método de Eletrorresistividade, os quais possuem diferentes vantagens e desvantagens entre si, além de sensibilidades distintas, principalmente quanto à detecção de variações laterais de resistividade elétricas em profundidade e na identificação de estruturas em mergulho (REYNOLDS, 2011).

Porém, alguns desses arranjos são mais frequentemente utilizados nos levantamentos de campo, tais como o arranjo Wenner e o Schlumberger na realização da técnica de sondagem elétrica vertical (SEV) e os arranjos dipolo-dipolo, polo-dipolo e polo-polo para a técnica de caminhamento ou imageamento elétrico, os quais possuem diferentes fatores geométricos (K) de acordo com as configurações de posicionamento de eletrodos, como se observa na Figura 9 (KURAS, 2002).

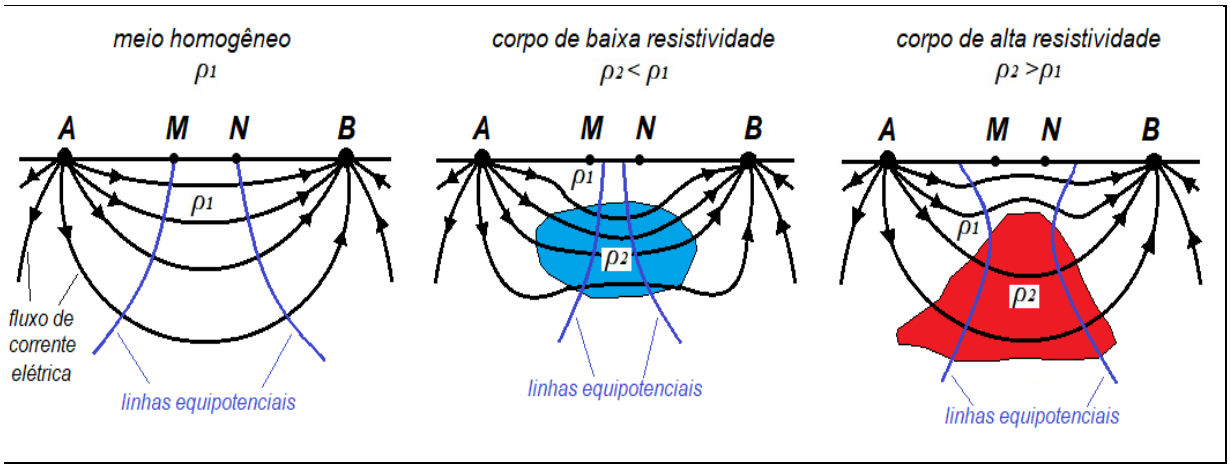
Figura 9 - Principais configurações de eletrodos da Eletrorresistividade.



Fonte: Adaptado de Kuras, 2002.

Na execução de qualquer técnica do método de Eletrorresistividade, as variações medidas do potencial elétrico representam a energia que deve ser despendida para a passagem do fluxo de corrente através do ambiente geológico, associados, portanto, com a resistividade elétrica dos materiais presentes em profundidade, como pode ser observado nos diagramas de quatro eletrodos da Figura 10, de Iakubovskii & Liajov (1980).

Figura 10 - Emissão de corrente elétrica em meios de resistividades diferentes.



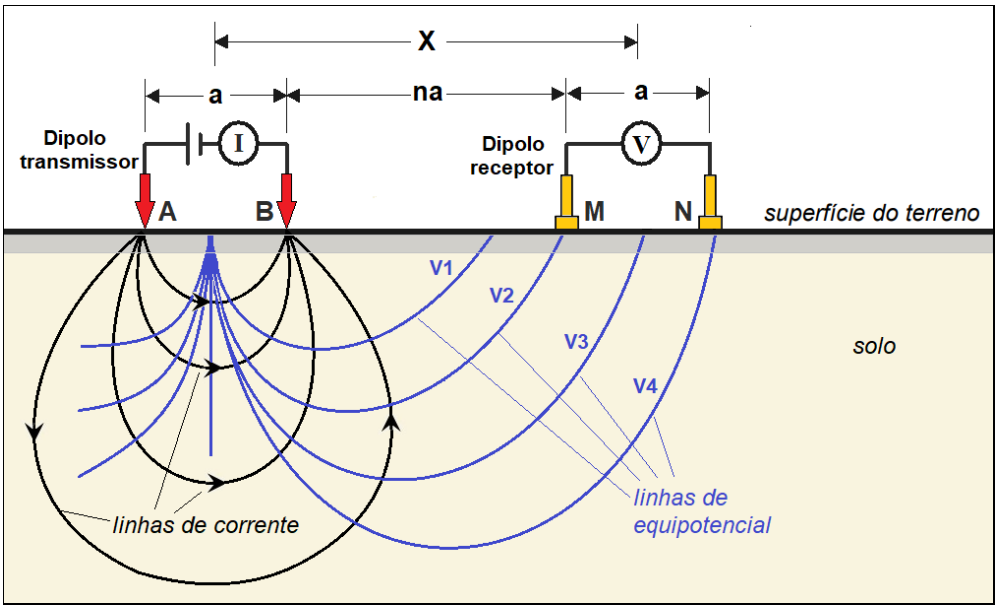
Fonte: Adaptado de Iakubovskii & Liajov, 1980.

Desta maneira, a Figura 10 descreve que a diferença do potencial elétrico (ddp) nos pontos de medida (M e N) diminui ou aumenta (distância entre as linhas equipotenciais) quando o fluxo de corrente elétrica atravessa um corpo de baixa resistividade elétrica ou de alta resistividade, respectivamente. Assim, o comportamento dos menores ou maiores valores de resistividade elétrica permite em estudos ambientais, por exemplo, a detecção da presença de contaminação inorgânica ou orgânica, nesta ordem.

Nos levantamentos para a investigação de feições ambientais em áreas contaminadas, uma das técnicas principais é o caminhamento elétrico (CE), também denominado por Reynolds (2011) de tomografia ou imageamento de resistividade elétrica. De modo geral, esta técnica é empregada na caracterização geológica e hidrogeológica, na localização de cavas com resíduos inorgânicos ou tambores enterrados, na delimitação de plumas de contaminantes inorgânicos e na determinação dos limites laterais e profundidade de aterros ou lixões.

De acordo com Kuras (2002), o método de Resistividade Capacitiva (RC), foco desta pesquisa, segue os pressupostos físicos e geométricos do método de Eletrorresistividade convencional (galvânica) pela técnica de caminhamento elétrico (ou tomografia de resistividade elétrica) com arranjo dipolo-dipolo (Figura 11), embora o diferencial seja a fonte de emissão de sinal de corrente elétrica para subsuperfície e a forma de recepção da tensão (ddp) sobre o terreno.

Figura 11 - Diagrama do arranjo dipolo-dipolo de caminhamento elétrico.



Fonte: Adaptado de Kuras, 2002.

A Figura 11 descreve que, no arranjo dipolo-dipolo convencional, os eletrodos de corrente A e B possuem o mesmo espaçamento (*a*) dos eletrodos de potencial M e N (AB=MN=*a*) e a profundidade de investigação cresce com a separação *X* entre esses pares de eletrodos e onde, segundo Kuras (2002), o fator geométrico K_{dd} de relação de distâncias entre eletrodos é expresso por:

$$K_{dd} = \pi . n\ (n+1)(n+2).\mathrm{a} \qquad \textbf{(3.11)}.$$

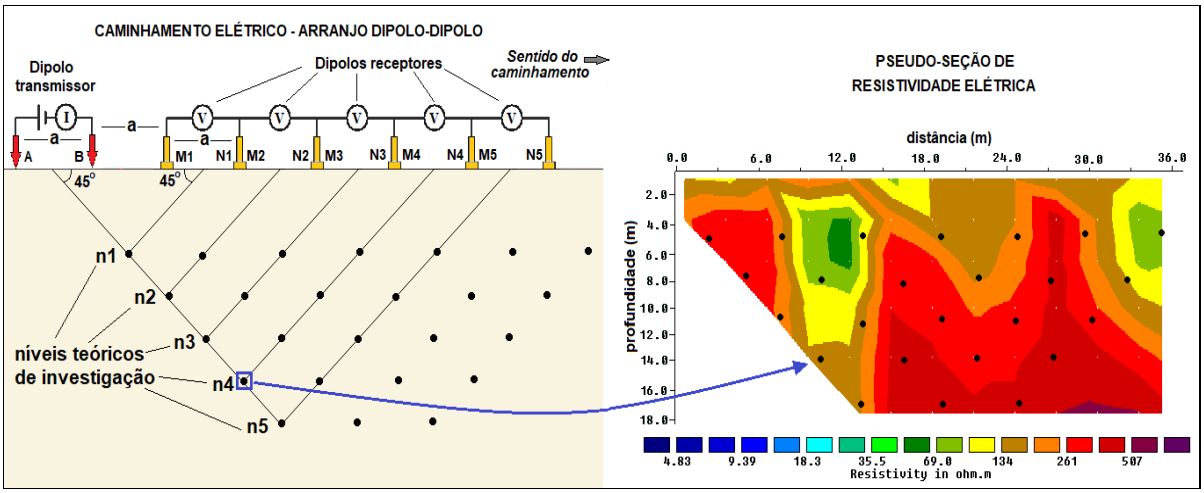
Deste modo, adotado o arranjo dipolo-dipolo e por meio do controle da corrente injetada (I) medida a tensão resultante (ΔV), a resistividade aparente é obtida pela equação (3.12), apresentada a seguir:

$$\rho_a = \pi . n\ (n+1)(n+2).\mathrm{a}.\frac{\Delta V}{I} \qquad \textbf{(3.12)},$$

onde “*a*” é a abertura dos dipolos e “n” o número inteiro relativo aos afastamentos gradativos entre os dipolos para se atingir profundidades maiores (Figura 12).

De acordo com Reynolds (2011), no arranjo dipolo-dipolo, o ponto de medida a ser plotado na pseudo-seção de resistividade elétrica é a intersecção do ponto médio entre o dipolo de corrente (A e B) e o dipolo potencial (M e N), locado em função de uma projeção de 45º a partir dos centros destes dipolos, como visualizado na Figura 12.

Figura 12 - Plotagem de dados do arranjo dipolo-dipolo da Eletrorresistividade.



Fonte: Adaptado de Reynolds, 2011.

A partir disso, verifica-se na Figura 12 que maiores separações entre os dipolos fornecem maior profundidade de investigação e esta profundidade está relacionada à distância do final do dipolo transmissor (eletrodo B) até o início do dipolo receptor (eletrodo M).

Desta forma, caso a separação entre o final do dipolo transmissor (B) até o início do dipolo receptor (M) é de uma vez a sua abertura (a), então “*n=1*”, e a leitura é plotada num primeiro nível de profundidade. Consequentemente, no afastamento "*n=2*" haveria uma distância de duas vezes o comprimento do dipolo (*2a*) e a medida seria plotada num segundo nível de investigação mais profundo que o anterior, e para uma separação de três vezes (*3a)*, onde "*n=3*", há o registro num terceiro nível mais profundo ainda e assim por diante, como apontado por Reynolds (2011).

Portanto, conforme este mesmo autor, um arranjo dipolo-dipolo de resistividade galvânica é realizado por meio de medidas sucessivas em afastamento de dipolos de

“*n=1*, *n=2*, *n=3, n=4”,* etc., onde cada medição representa uma resistividade aparente em uma profundidade cada vez maior. Assim, este procedimento permite gerar múltiplos perfis 1D de resistividade elétrica para níveis de investigação distintos ao longo de uma linha de levantamento e possibilita posteriormente a elaboração de pseudo-seções 2D de valores interpolados (Figura 12).

Desta forma, o fator *n* é um parâmetro geométrico de proporcionalidade entre a separação entre os dipolos transmissor e receptor e que está relacionado de forma direta ao aumento de profundidades de investigação quando estes afastamentos são cada vez maiores e cujo conceito também será aplicado na discussão mais à frente do levantamento pelo método de Resistividade Capacitiva.

3.4. Método de Resistividade Capacitiva (RC)

O método de Resistividade Capacitiva (RC) está inserido num grupo maior da Geofísica Aplicada, que são os métodos de Resistividade Elétrica, cuja reclassificação e outras correções foram indicadas em tópico anterior perante à necessidade de poder contemplar a metodologia geofísica aplicada nesta pesquisa.

Dentre algumas definições usuais do método de Resistividade Capacitiva, a descrição apresentada por Kuras (2002) é que melhor exprime a ideia da concepção e aplicabilidade da medição de resistividade de maneira capacitiva e a descreve da seguinte forma: “é um método geofísico utilizado para caracterização não invasiva de subsuperfície rasa por imageamento elétrico e é capaz de ampliar o escopo dos métodos de resistividade elétrica para os ambientes urbanos e outros locais onde o contato galvânico não pode ser efetuado ou onde altas impedâncias resultam em má qualidade dos obtidos”.

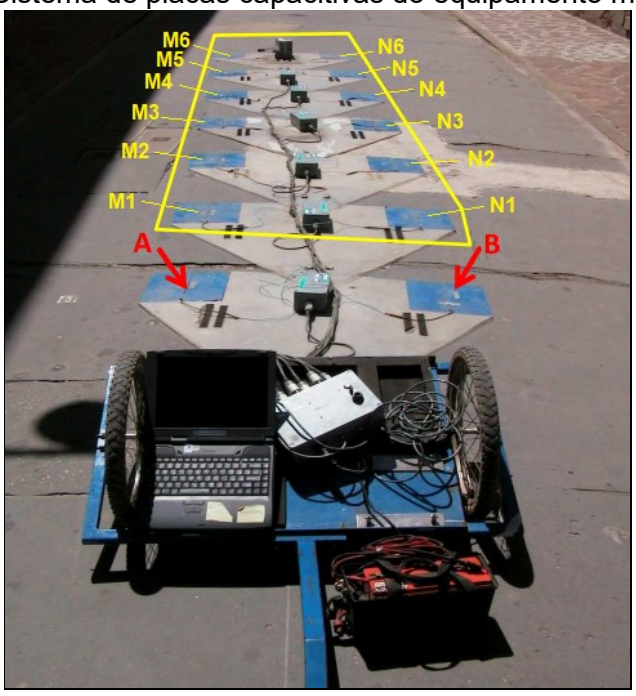
Fundamentalmente, de acordo com este autor, o método de Resistividade Capacitiva é baseado no conceito de acoplamento capacitivo entre o sensor e o terreno, uma generalização do arranjo dipolo-dipolo de corrente contínua para medições de resistividade de subsuperfície, atuando numa mesma faixa de frequência do método *VLF*, entre 10,0 e 18,0 kHz.

Assim, neste método de investigação subterrânea, a injeção de corrente elétrica no solo (I) ocorre através das diferenças de cargas de um dipolo em contato com a superfície do terreno, portanto num sistema capacitivo, e com a tensão resultante (ΔV) medida no dipolo receptor, proporcional à resistividade elétrica da porção de subsuperfície que separa os dois dipolos e a corrente emitida.

Comparativamente ao método de Eletrorresistividade convencional de eletrodos galvânicos, de acordo com Groom (2008), as medições de corrente alternada pelo método de Resistividade Capacitiva são, geralmente, imunes às interferências telúricas naturais ou originadas por linhas de energia, isto porque estas fontes criam correntes alternadas de frequências, relativamente, bem mais baixas que as frequências operacionais dos dipolos capacitivos restritas à faixa de 10,0 a 18,0 KHz.

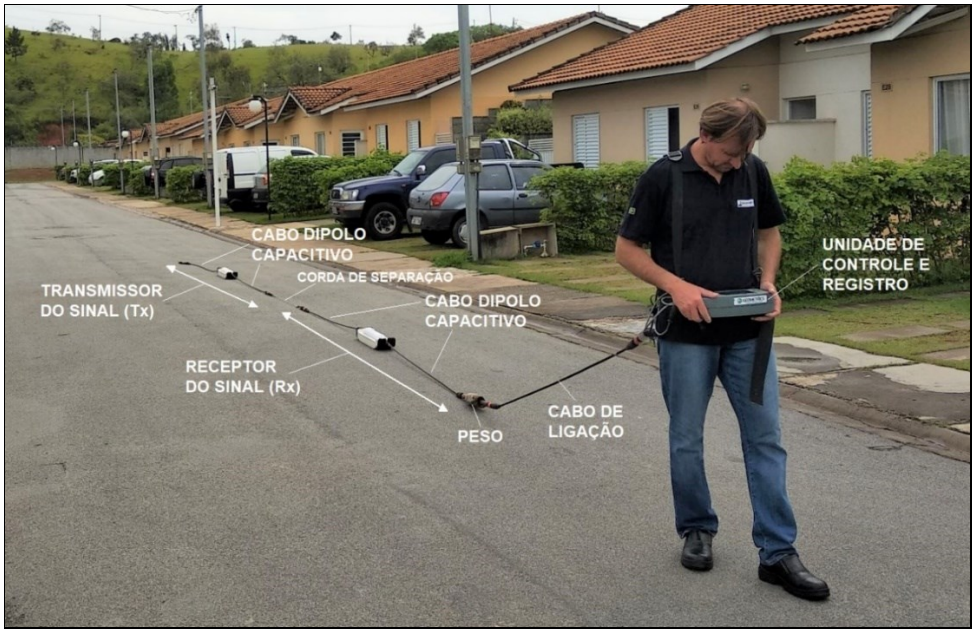
De acordo ao apontado por Timofeev *et al.* (1994), os pressupostos de injeção de corrente para o método de Resistividade Capacitiva são fundamentados no arranjo dipolo-dipolo da Eletrorresistividade convencional. Neste sentido, podem ser citados dois sistemas capacitivos comerciais comumente utilizados e que empregam este arranjo de campo, porém de formas distintas entre si, a saber, o equipamento *Corim* de placas capacitivas (Figura 13) e o *Ohmmapper* de antenas capacitivas (Figura 14).

Figura 13 - Sistema de placas capacitivas do equipamento modelo Corim.



Fonte: Adaptado de Iris Instruments, 2002.

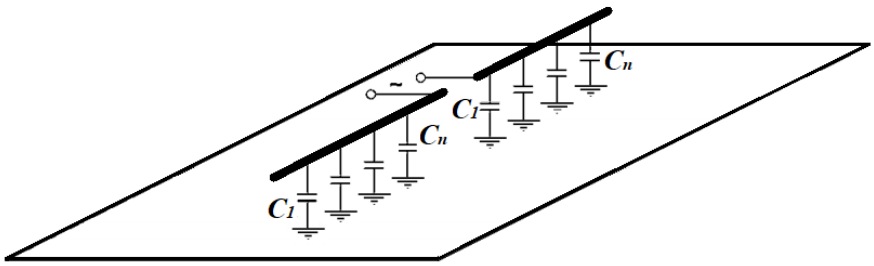
Figura 14 – Sistema de eletrodos por antenas capacitivas do Ohmmapper.



Fonte: O autor.

Nesta pesquisa, foi empregado o sistema *Ohmmapper TR1* (Figura 14), da Geometrics Inc. (EUA), que deriva dos equipamentos *Ruscan* e *VCHEP*, idealizados e construídos por Timofeev *et al*. (1994). Neste conjunto, o transmissor de corrente elétrica e o receptor de tensão operam na mesma frequência de 16,5 kHz e funcionam como dois pares de dipolos e constituem um arranjo dipolo-dipolo, com cabos capacitivos transmissor e receptor posicionados numa forma alinhada à direção do perfil a ser executado, atuando como linha de antenas (Figura 15).

Figura 15 - Modelo de eletrodo capacitivo de antena em linha do *Ohmmapper*.



Fonte: Kuras *et al*., 2006.

De acordo com Kuras (2006), uma antena capacitiva ou eletrodo capacitivo são formados por um conjunto de capacitores idênticos conectados em paralelo, como o indicado na Figura 15, e que constituem para este autor um sensor capacitivo, cuja

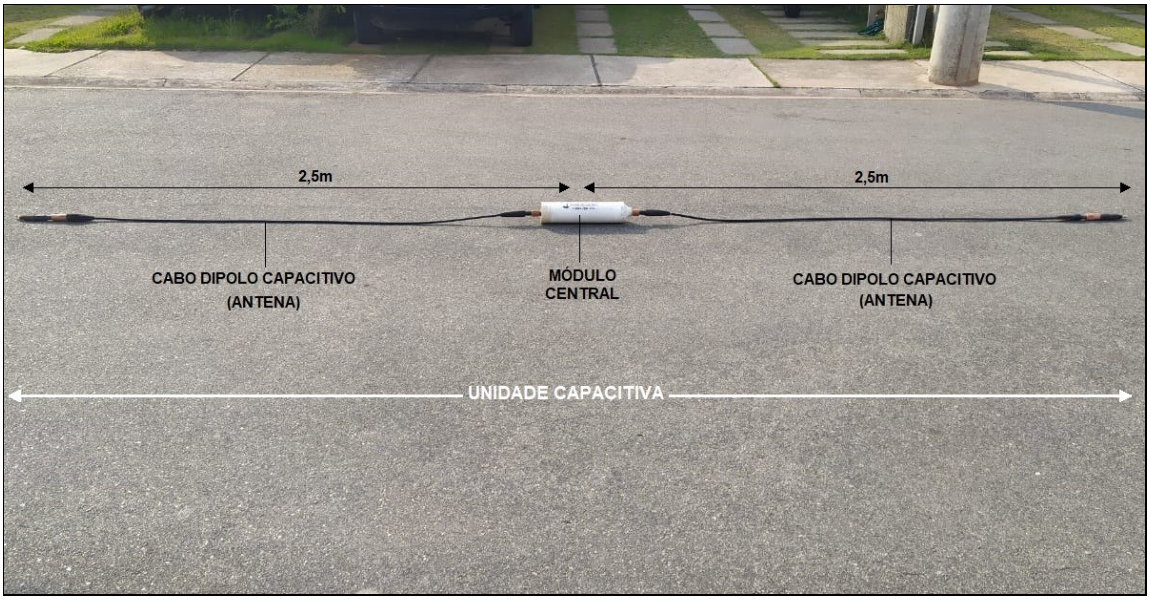
capacitância total (Ct) está correlacionada à somatória das capacitâncias individuais dos capacitores que o formam (segmentos) e pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Ct = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} Ci \qquad \textbf{(3.13)},$$

No equipamento *Ohmmapper*, a saída de corrente elétrica está numa faixa entre 0,25 e 16,0 mA e é mantida num nível constante pelo transmissor do equipamento de acordo às condições locais e, como não existe ligação física entre os conjuntos de transmissão e recepção, a informação sobre a corrente elétrica injetada é modulada no sinal a ser decodificado pelo sistema receptor para cálculo posterior da resistividade elétrica (KURAS, 2002).

Em relação aos componentes básicos que compõem o sistema instrumental *Ohmmapper TR1* (Figura 14), estes são representados pelos conjuntos transmissor e receptor (cabos coaxiais dipolos capacitivos e módulos centrais com diodos e outros componentes eletrônicos), unidade de controle para configuração da aquisição e de registro dos dados obtidos (modelo G-858), peso utilizado como lastro para manter a proximidade dos cabos capacitivos com o terreno, além de cabo de ligação entre o receptor e a unidade de controle para transferência de dados.

Figura 16 - Detalhe do dipolo capacitivo do Ohmmapper.

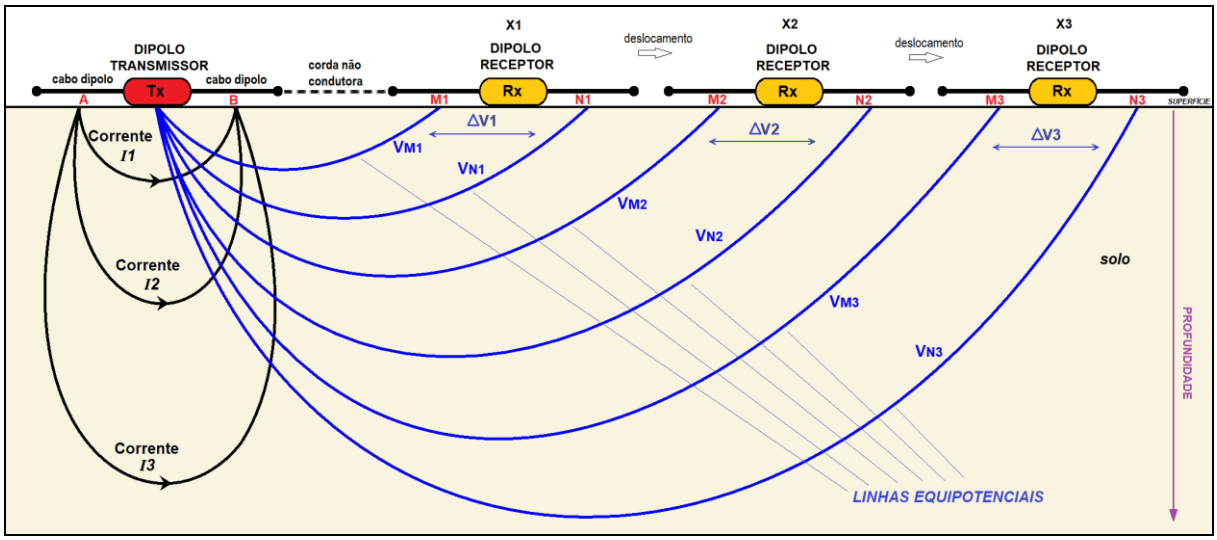


Fonte: O autor.

Quanto aos cabos coaxiais transmissor ou receptor, denominado como cabo dipolo capacitivo (Figura 16) ou cabo capacitivo dipolar, estes são constituídos internamente por um par de fios de cobre trançados e têm como papel a geração das diferentes cargas elétricas no terreno (GEOMETRICS, 2001). Assim, em conjunto com os módulos centrais, formam os sistemas de transmissão de corrente e recepção da tensão elétrica, cujas concepções foram estabelecidas por Timofeev *et al*. (1994) quando da aplicação com sucesso de dispositivos operando como antenas transmissora e receptora.

Segundo Kalinski & Sripada (2005), especificamente para o sistema *Ohmmapper*, a substituição de pares de eletrodos de corrente (A e B) e de potencial elétrico (M e N) por pares de cabos coaxiais transmissores e receptores (antenas) permite que suas separações variem de forma similar ao afastamento dos dipolos nas medições da Eletrorresistividade convencional (Figura 17).

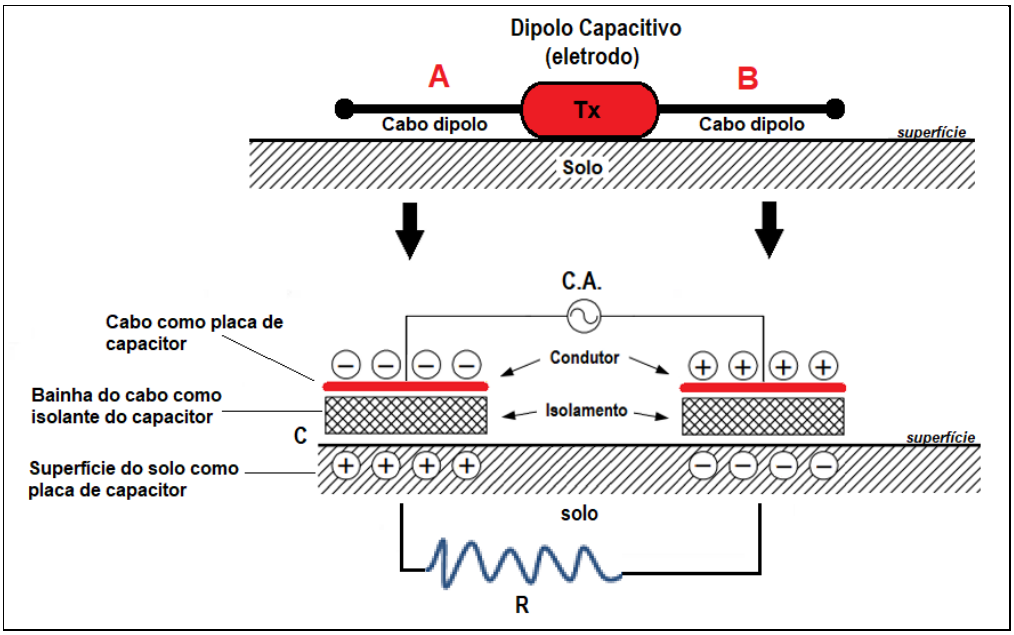
Figura 17 - Correntes e potenciais elétricos nos dipolos do Ohmmapper.



Fonte: O autor.

Conforme esses autores, quando uma corrente alternada na frequência de 16,5 kHz é aplicada ao par de cabos coaxiais condutores eletricamente isolados do solo, cada par de condutores atua como um par de capacitores que estabelecem cargas no terreno **por indução e não por contato** e emitem corrente elétrica para subsuperfície, sendo que tal acoplamento capacitivo de cabo-terra, de acordo Yamashita *et al*. (2004), é caracterizado por uma capacitância elétrica variável (*C*) e depende das condições de resistência (*R*) do terreno (Figura 18).

Figura 18 - Acoplamento capacitivo de injeção de corrente elétrica.



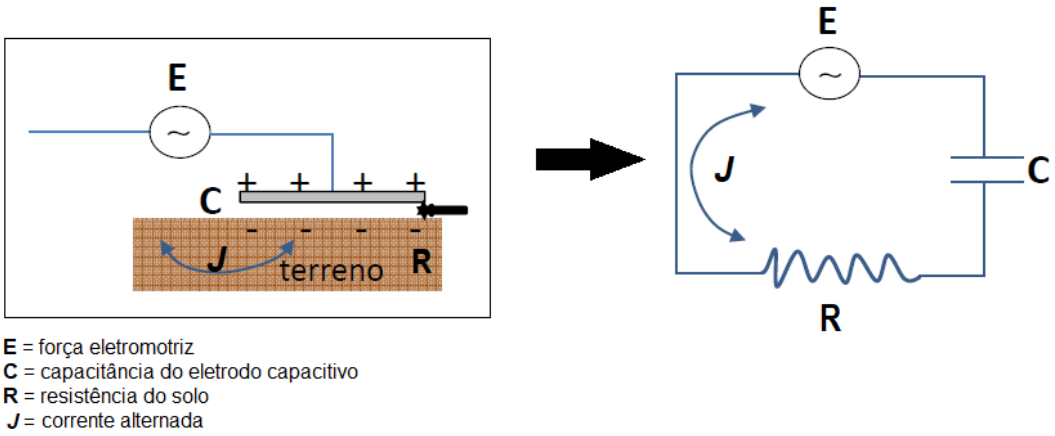
Fonte: Adaptado de Yamashita *et al.*, 2004.

Após a injeção de corrente de forma capacitiva por este equipamento, a tensão (potencial elétrico) é medida através de seus dipolos capacitivos receptores graças a um processador instalado no módulo central receptor, cujo algoritmo permite a esta unidade sincronizar em torno da frequência transmitida de 16,5 kHz.

Deste modo, a partir da captação do potencial elétrico, este processador converte a leitura da tensão num sinal digital, transferida numa taxa máxima de amostragem de até 0,5 s (2,0 Hz) através de um cabo serial (cabo de ligação) para a unidade registradora de dados, com conversão interna posterior em valores de resistividade elétrica aparente pela aplicação do fator geométrico adequado ao arranjo utilizado (KURAS, 2002).

Em maiores detalhes, conforme apresentado por Shima *et al*. (1996), o circuito elétrico resistivo-capacitivo equivalente a um sistema de eletrodo capacitivo de emissão de corrente no solo, de acordo ao conceito físico descrito nos parágrafos anteriores, é representado pelo modelo apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Modelo de eletrodo capacitivo e circuito elétrico equivalente.



E = força eletromotriz
C = capacitância do eletrodo capacitivo
R = resistência do solo
J = corrente alternada

Fonte: Adaptado de Shima *et al.*, 1996.

No circuito da Figura 19, quando a tensão alternada *E* (força eletromotriz) é aplicada a um eletrodo condutor (placa ou cabo) isolado do solo e suspenso, cargas elétricas aparecem entre este eletrodo e o terreno e funciona como um capacitor. De acordo com Shima *et al.*, 1996, caso a frequência desta tensão seja alta o suficiente para evitar a saturação deste sistema capacitor, é possível gerar corrente alternada no solo de forma constante.

Consequentemente, para que estabeleça o efeito capacitivo do eletrodo com o terreno, a magnitude da corrente representada por *J* neste modelo de circuito elétrico será dada pela seguinte equação de acordo com a Lei de Kirchhoff:

$$J = \frac{E}{R + \frac{1}{(i\omega C)}} \qquad \textbf{(3.14)},$$

onde *R* é a resistência do terreno em Ohms, *ω* é a frequência angular (radianos/s), *C* é a capacitância do eletrodo em Farads (SHIMA *et al.*, 1996)

3.5. Condições para aplicabilidade do método de Resistividade Capacitiva

Segundo Kuras (2002), além da separação entre o transmissor e o receptor de sinal, a resistividade elétrica do terreno também influencia na atenuação do sinal e na profundidade de investigação do método Resistividade Capacitiva, isto porque, pela Lei de Ohm, a amplitude da tensão é diretamente proporcional à resistência do meio

através do qual a corrente elétrica flui ($\Delta V = I.R$), portanto com diferenças de penetração da corrente elétrica emitida em terrenos resistivos ou condutivos.

Assim, para uma determinada corrente elétrica injetada, caso a resistência elétrica do terreno for alta (por exemplo solo arenoso), a tensão gerada também será alta, condição que facilita as medições e possibilita uma profundidade maior de amostragem. Em contrapartida, caso a resistência for baixa (por exemplo solo argiloso), a tensão resultante será baixa, situação que dificulta as leituras em níveis mais profundos uma vez que o sinal desaparece muito mais rápido (maior atenuação) em relação às condições mais resistivas.

Deste modo, o comportamento descrito anteriormente é o inverso ao que acontece com a Eletrorresistividade convencional de contato galvânico e muito similar ao que é observado no método Eletromagnéticos no Domínio da Frequência, como também no método *GPR*.

Baseado na maior atenuação do sinal em ambientes de maior condutividade elétrica como restrição importante à implementação do método de Resistividade Capacitiva, os conjuntos transmissor e receptor não devem estar localizados sobre piso ou pavimentos com água acumulada ou sobre solos superficiais totalmente saturados (GEOMETRICS, 2001), condição que prejudica o efeito capacitivo desejado para a transmissão de corrente elétrica para subsuperfície.

Dentro deste contexto, outra condição relevante para aplicabilidade do método em questão é que a separação entre o conjunto transmissor e o receptor não deve exceder o parâmetro denominado *skin depth* (d), termo traduzido algumas vezes como “profundidade de pele” ou “profundidade de penetração”, e que está associado à atenuação do campo elétrico emitido, referente à profundidade na qual a intensidade é reduzida a 37% de seu valor original (MILSOM, 2003), calculada de acordo com Timofeev *et al.* (1994) por:

$$d = 15{,}9\sqrt{\frac{\rho}{f}} \qquad \textbf{(3.15)},$$

onde ρ é a resistividade elétrica do meio em ohm.m e f é a frequência do sinal emitido em kHz.

A equação anterior (3.15) expressa a relação direta da resistividade elétrica do ambiente com o limite estabelecido pelo parâmetro *skin depth*, onde quanto maior for a resistividade do terreno maior será o valor calculado, e, portanto, maior será a abertura permitida entre os conjuntos transmissor e receptor.

Como exemplo de cálculo do limite de abertura máxima entre o transmissor e receptor para um terreno argiloso e de baixa resistividade elétrica, da ordem de 20,0 ohm.m, e como referência a frequência de 16,5 kHz que opera o *Ohmmapper*, o valor obtido para o *skin depth* será igual a 17,5 m, o que significa que a separação das unidades transmissora e receptora deverá ser obrigatoriamente menor que esta distância.

Por outro lado, a operação na mesma frequência para um solo arenoso, com resistividade elétrica de 200 ohm.m, o valor resultante do *skin depth* será 55,3 m, o que permite em termos comparativos uma maior abertura entre o transmissor e o receptor que o exemplo anterior de solo argiloso.

Caso seja atendida a condição onde a distância entre transmissor e receptor for menor ao *skin depth,* o efeito de correntes de deslocamento, associado à propriedade de permissividade dielétrica, será pequeno e pode ser negligenciado. Desta maneira, a resistividade aparente medida de forma capacitiva poderá ser considerada equivalente à de medições galvânicas de corrente direta (método convencional), onde predominam as correntes de condução (TIMOFEEV et al., 1994).

Esta situação onde os efeitos das correntes de deslocamento são desprezíveis é denominada de regime *quasi-estático* que, por outro lado, segundo Kuras (2002), está inserida numa situação onde os fenômenos indutivos são insignificantes, que para os métodos eletromagnéticos é chamado de condição de baixo número de indução.

Assim, como apontado por Adams (2008), consideradas às correntes de deslocamento no regime *quasi-estático,* a fórmula da Lei de Ampère que indica que o campo magnético (H) é produzido pelas correntes de condução (J) e pela variação das correntes de deslocamento (D), a saber:

$$\Delta \mathrm{x} \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\delta \boldsymbol{D}}{\delta t} \qquad \textbf{(3.16)},$$

passa a ser dependente apenas das correntes de condução (*J*) ou seja, somente da densidade de corrente elétrica em unidades de A/m^2, como visto a seguir:

$$\Delta x \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} \qquad \textbf{(3.17)}.$$

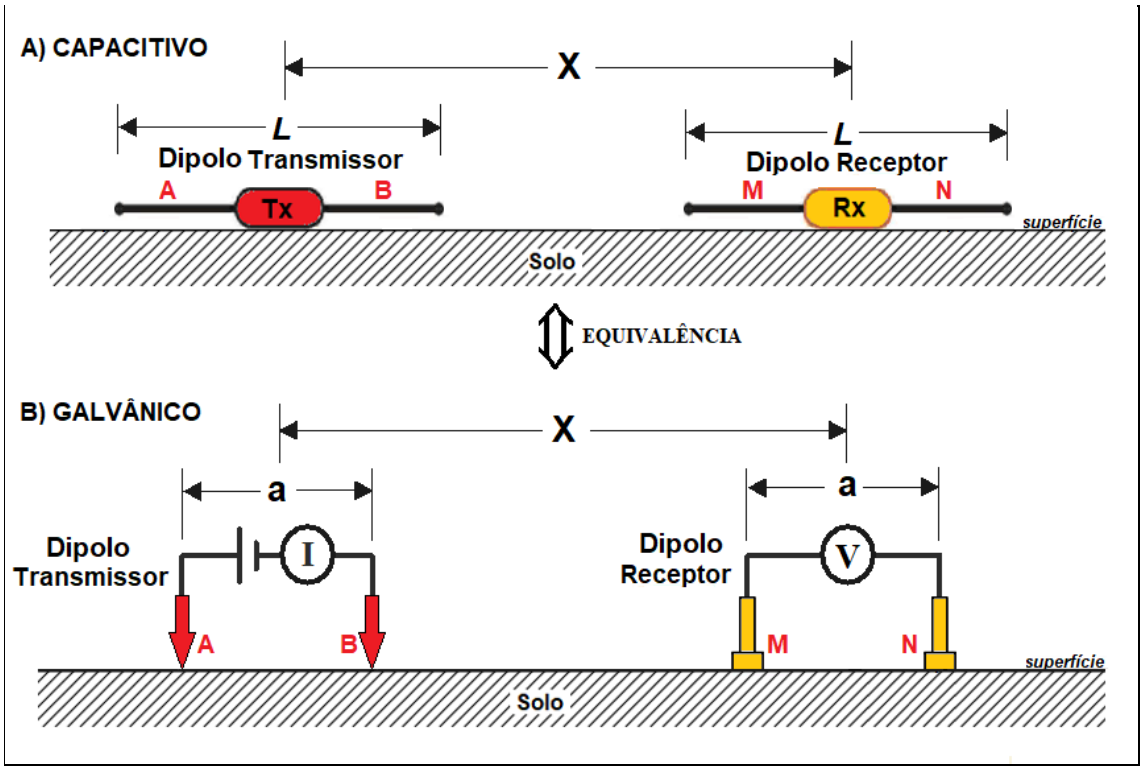
Neste caso, para se estabelecer a correlação entre a condutividade elétrica do meio (ou sua inversa resistividade) é definida uma das chamadas relações constitutivas, representada por:

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} \qquad \textbf{(3.18)},$$

que na verdade é a Lei de Ohm descrita para a dimensão microscópica dos fenômenos elétricos, e onde σ é a condutividade elétrica (S/m) e E é o campo elétrico em (N/C).

Uma outra condição importante, apontada por Kuras (2006), corresponde à equivalência entre o arranjo dipolo-dipolo num sistema capacitivo com antenas dipolos em linha e um arranjo dipolo-dipolo de resistividade galvânica com eletrodos cravados no solo (Figura 20).

Figura 20 - Equivalência entre arranjo dipolo-dipolo capacitivo e galvânico.



Fonte: Adaptado de Kuras, 2006.

De acordo com Kuras *et al.* (2006), em ambos os casos, a profundidade da investigação é determinada pela geometria do arranjo, independentemente da frequência do sinal ou do tempo da medição, visto que a resistividade aparente é calculada usando um fator geométrico K, seja para arranjo galvânico dipolo-dipolo (K_{dd}), como indicado anteriormente, seja para o arranjo capacitivo com antenas lineares (K_{LA}).

Desta maneira, conforme esse mesmo autor, para que haja equivalência entre os arranjos (Figura 20), o fator geométrico com dipolos galvânicos e com dipolos capacitivos devem ser iguais ($K_{dd}= K_{LA}$), sendo que para o arranjo capacitivo de antenas lineares este fator será dado por:

$$K_{LA} = \frac{\pi L}{\ln\left[\left(\frac{b^2}{b^2-1}\right)^{2b}\left(\frac{b^2+2b}{(b+1)^2}\right)^{b+2}\left(\frac{b^2-2b}{(b-1)^2}\right)^{b-2}\right]} \qquad \textbf{(3.19)},$$

onde *X* é a separação entre os eletrodos capacitivos transmissor e o receptor, *L* é o comprimento desses e $b = \frac{2X}{L}$.

Porém, em função da concepção e constituição distintas dos eletrodos aterrados e capacitivos, os fatores geométricos de arranjos equivalentes da resistividade galvânica (equação 3.11) e da resistividade capacitiva (equação 3.19) não serão absolutamente os mesmos.

Como resultado dessa condição, a razão entre as extensões do dipolo galvânico e do dipolo capacitivo (*a/L*) serão sempre menores que 1,0, o que implica que o comprimento das antenas capacitivas (*L*) sempre será maior que a abertura dos dipolos aterrados (*a*), visto que o dipolo capacitivo pode ser até duas vezes maior que o galvânico em separações curtas (*X<1,5L*), como exemplificado na Figura 20.

Para essas menores distâncias de separação de eletrodos, a diferença entre os valores dos fatores geométricos dos arranjos galvânicos (K_{dd}) e capacitivo (K_{LA}) pode chegar de 7 até 16%, e atingir menos de 1% quando o distanciamento for maior que quatro vezes a dimensão das antenas capacitivas (*X>4,0L*), conforme indicado no artigo de Kuras *et al.* (2006).

Portanto, ao calcular as resistividades aparentes através dos programas de inversão e modelamento para dados obtidos com o arranjo dipolo-dipolo galvânico e com o arranjo de antenas capacitivas, os valores adquiridos pelo aparato capacitivo sempre serão numericamente menores.

Além disso, baseado nas premissas anteriores e considerada uma mesma seção obtida no mesmo local pelos dois métodos, quanto menores as profundidades amostradas, maiores são as diferenças entre os valores calculados para o arranjo de antenas capacitivas e os do arranjo galvânico, com redução das diferenças para níveis mais profundos em função das maiores distâncias entre os eletrodos.

3.6. Aquisição de dados no Sistema Ohmmapper

Fundamentado nas terminologias dos métodos geofísicos discutidas anteriormente, foi adotada a técnica de campo de imageamento de resistividade capacitiva (IRC) na aquisição de dados desta pesquisa, que pode ser convencionalmente denominada de caminhamento elétrico capacitivo (CEC), por meio do arranjo dipolo-dipolo para os eletrodos capacitivos de emissão e recepção do sinal geofísico. Assim, a técnica de imageamento de resistividade capacitiva (IRC) é a aquisição de dados de resistividade elétrica de forma capacitiva em campo e ao longo de um mesmo perfil em diferentes profundidades de investigação.

Pós-aquisição, o processamento permite a geração de imagens de dados processados e interpolados (seções) com intuito de analisar as variações laterais de resistividade e a continuidade das feições ou estruturas em subsuperfície (REYNOLDS, 2011).

Neste sentido, a finalidade primordial deste trabalho é determinar, nessas seções, os contrastes medidos entre os valores de resistividade elétrica dos materiais geológicos naturais em relação aos valores anômalos gerados pelas substâncias contaminantes orgânicas, inorgânicas ou metálicas presentes em profundidade.

Como indicado, foi utilizado um sistema de acoplamento capacitivo, modelo *Ohmmapper TR1* de único receptor (Figura 14), marca Geometrics (EUA), cujas especificações técnicas em detalhe são apresentadas no Quadro 4 a seguir.

Quadro 4 - Especificações técnicas do resistivímetro Ohmmapper.

Especificações Técnicas do Equipamento Ohmmapper:

- Princípio de funcionamento: resistividade dipolo-dipolo, corrente constante acoplada capacitivamente;
- Faixa de operação: Menos de 1 ohm.m para mais de 100.000 ohm.m;
- Taxa de ciclo: taxa de amostragem e registro de sinal em 2 vezes por segundo;
- Armazenamento de dados: 2 Mbytes de memória RAM não volátil
- Saída de Áudio: Metrônomo, amplitude do sinal, desconexão;
- Saída Visual: Visor LCD gráfico de 320 por 200, luz natural visível com saídas selecionáveis;
- Exibição de dados: até 5 perfis de linha de resistividade;
- Relógio Interno: Resolução de 0,1, derivação menor que 1,0 segundo por dia.
- Pesos:

Console: 1,6 kg; Transmissor: 2 kg; Receptor: 2 kg; Bateria e correias: 1,6 kg; Peso do arranjo depressor (lastro): 3 kg (estimativa)

Especificações do Transmissor:

- Frequência: abaixo de 18 kHz
- Corrente de saída: variável de 16 mA a 0,25 mA

Especificações do Receptor:

- Comprimentos do dipolo: 5m, 10m, 15m, 20m, comprimentos mais longos opcionais
- Especificações de entrada: 5 Mhos
- Precisão de tensão medida: 1%
- Faixa de tensão de entrada: 0-2 Volts RMS
- Rejeições de linha de energia: maior que 100 dB

Espaçamento:

- Espaçamento variável.

Dimensões:

- Console: 15 × 8 x 28 cm
- Bateria do transmissor/receptor: 8 × 14 × 20 cm

Baterias:

- Bateria do Transmissor e Receptor: 12 Volts DC
- Console: 28 Volts DC
- Bateria interna para relógio e memória RAM não volátil.

Tipos de pesquisa:

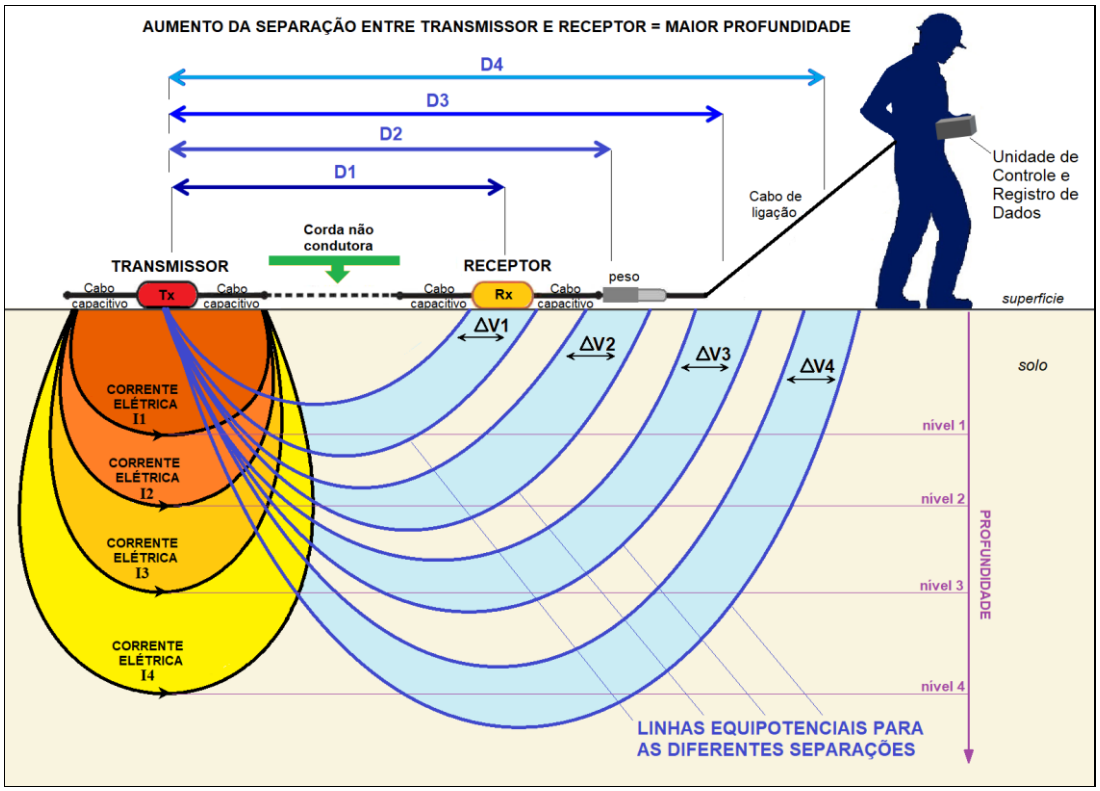
- Contínua, Resistividade dipolo-dipolo com off-set constante (multi-linhas com espaçamento constante de transmissor-receptor para mapeamento e visualização em planta)
- Offset de deslocamento variável, dipolo-dipolo. (Espaçamento de transmissor-receptor variável para várias passagens em uma única linha de perfil para criar uma pseudo-seção.)

Fonte: Geometrics, 2001.

Na execução do imageamento elétrico com o equipamento *Ohmmapper TR1* de um receptor de sinal (sistema monorreceptor), é necessário repetir mais vezes o mesmo perfil de levantamento, com separações sucessivamente maiores entre o

transmissor e o receptor para possibilitar amostragens de porções geológicas gradativamente mais profundas (Figura 20) que permitam a interpolação posterior de dados e elaboração de uma seção de resistividade elétrica (GEOMETRICS, 2001).

Figura 21 - Diagrama do sistema monorreceptor de Resistividade Capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

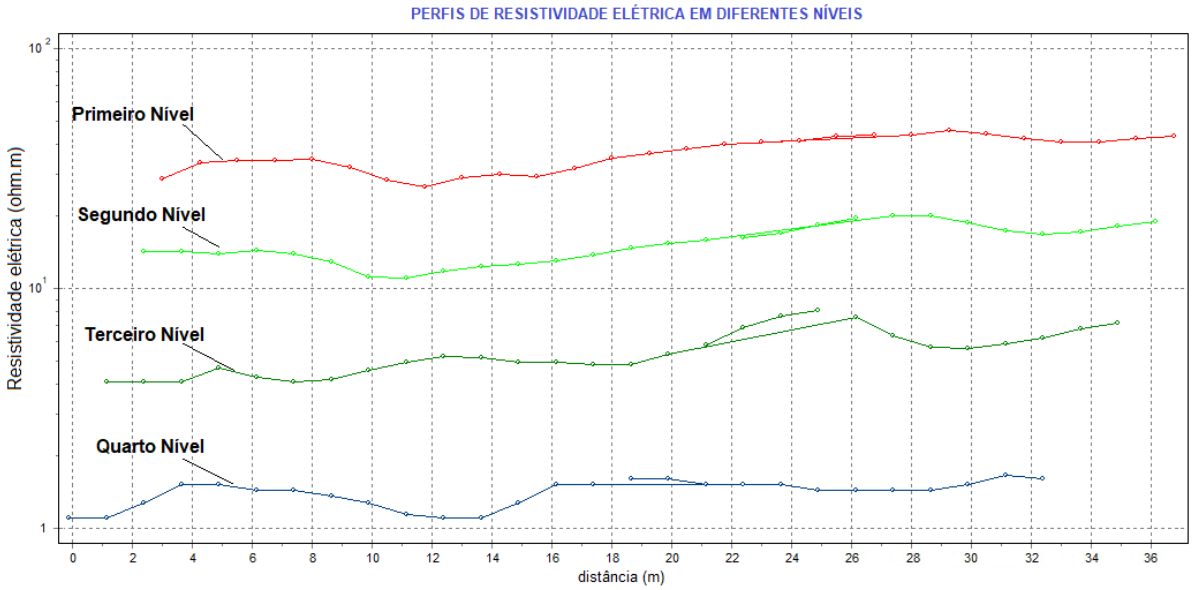
Desta forma, é possível observar no diagrama da Figura 21 que para cada separação entre o conjunto transmissor (Tx) e o receptor (Rx) haverá a emissão de corrente elétrica específica (I) para cada porção em profundidade e que gerará linhas equipotenciais semicirculares, cuja diferença de potencial correspondente (ΔV) será registrada.

Assim, à medida que esta distância entre transmissor e o receptor aumenta, será efetuada uma nova injeção de corrente que dará origem a outras equipotenciais que serão detectadas no novo posicionamento do receptor, com repetição do processo com outros afastamentos para profundidades maiores (Figura 21).

Como o objetivo da técnica de imageamento é a aquisição de dados para avaliação de variações laterais e em profundidade de resistividade elétrica, são

executados caminhamentos com uma primeira distância de separação entre o transmissor e receptor (D1), com repetição da mesma linha de levantamento com uma segunda separação (D2) e assim por diante (D3,D4,...). Os resultados são perfis de resistividade em diferentes níveis de investigação, como pode ser observado na Figura 22, cujos dados são agrupados em etapa de processamento posterior.

Figura 22 - Perfis de resistividade elétrica para diferentes profundidades.



Fonte: O autor.

Cabe ressaltar que existem casos onde é possível adotar apenas uma ou duas separações entre os conjuntos transmissor e o receptor, que dependerá do objetivo do trabalho e onde a elaboração de seções não é o objetivo principal, quando, por exemplo, a finalidade é executar o mapeamento em planta da distribuição de resistividade elétrica tão somente em um ou dois níveis de profundidade numa determinada área suspeita de contaminação.

Neste caso, o número e a distribuição das linhas de levantamento devem ser adequados a permitir a interpolação dos dados obtidos de resistividades elétrica de forma representativa na área investigada.

No programa de aquisição de dados Magmap2000 do equipamento *Ohmmapper*, é possível parametrizar a aquisição de dados pela frequência de amostragem dos dados através da alteração do tempo de disparo do sinal (GEOMETRICS, 2001). Este ajuste possibilita a execução de medições contínuas ou

com intervalos menores que 30,0 cm conforme a necessidade, além de permitir a alteração das distâncias entre transmissor e receptor para modificar a profundidade de investigação e uma resolução vertical da ordem de 1,0 m ou menos, a depender da separação entre transmissor e receptor (KURAS, 2002).

O receptor do equipamento fornece dados de medição a uma taxa máxima de duas leituras por segundo (2,0 Hz), referentes à tensão medida e a corrente elétrica do transmissor, visto que a unidade de controle (console) possui espaço de armazenamento não volátil para cerca de 24 horas de aquisição de dados para esta taxa de aquisição (GEOMETRICS, 2001).

De modo geral, conforme informações do fabricante do instrumento, a profundidade máxima que o *Ohmmapper* consegue detectar variações de medidas em qualquer local depende da distância máxima entre o transmissor e o receptor, que pode atingir uma faixa média desde 5,0 até 15,0 m de profundidade.

Porém, este nível máximo de investigação está relacionado à capacidade do sinal emitido pelo transmissor ser captado e decodificado com segurança pelo receptor. Assim, conforme KURAS (2002), o alcance da corrente elétrica em profundidade e da detecção de sua resposta dependerá, primordialmente, da resistividade elétrica (condutividade) do ambiente de propagação, como visto em discussão anterior sobre o parâmetro *skin depth*.

Em relação à distância entre o transmissor e o receptor, o sistema operacional do *Ohmmapper TR1* permite a aquisição de dados com separações padrão (*default*) entre o final do conjunto transmissor e o início do conjunto receptor de 1,0, 5,0, 10,0 e 20,0 metros e que são determinadas pelos comprimentos da “corda não condutora” (Figura 20). Por sua vez, esses padrões de distâncias também podem ser alterados no programa Magmap2000 de acordo com a finalidade do levantamento e da correlação com a profundidade do alvo (GEOMETRICS, 2001).

Por fim, fundamentado nos aspectos descritos sobre a metodologia de aquisição de dados de resistividade elétrica com este instrumento, a realização de perfis de Imageamento de Resistividade Capacitiva (IRC), basicamente, pode ser subdividida nas seguintes atividades em campo:

a) montagem dos eletrodos capacitivos do conjunto de transmissão e de recepção do sinal elétrico (Figura 23) e fixação da separação entre eles pela corda não condutora;
b) conexão dos cabos do conjunto receptor com a unidade de registro de dados;
c) acesso ao programa operacional de aquisição de dados na unidade de controle e configuração dos parâmetros de levantamento;
d) checagem da comunicação dos diferentes componentes do sistema através do programa operacional;
e) posicionamento do centro do conjunto transmissor no ponto inicial do perfil a ser levantado;
f) início da aquisição de dados através do arraste do sistema completo ao longo do perfil de interesse e registro automático dos dados adquiridos;
g) repetição do mesmo perfil com maiores separações do conjunto transmissor e receptor para amostragens mais profundas.

Figura 23 - Montagem do eletrodo capacitivo do Ohmmapper.



Fonte: O autor.

- 3.6.1. Separações entre dipolos e o fator de proporcionalidade *n*

Segundo Groom (2008), para aquisição de dados e plotagem das resistividades elétricas em diferentes profundidades de investigação nas seções de Resistividade Capacitiva, é necessária a determinação de um parâmetro geométrico e que é expresso pela razão da distância entre o transmissor e receptor e do comprimento total do dipolo e que é o fator de proporcionalidade *n*.

Deve ser ressaltado aqui que este fator de proporcionalidade *n* não equivale ao fator geométrico K_{LA}, utilizado para correção das medidas nas diferentes distâncias entre transmissor e receptor, cuja fórmula de cálculo é bem mais complexa (equação 3.19), como indicado nas discussões da seção 3.5. na comparação de arranjos equivalentes da Resistividade Capacitiva e da Eletrorresistividade galvânica.

Assim, de acordo às notações das grandezas geométricas indicadas para o equipamento *Ohmmapper* (Geometrics, 2001), o fator *n* corresponde à proporção entre o comprimento (*S*) da corda não condutora, que separa a extremidade do transmissor e do receptor, e a dimensão do dipolo receptor (*P*), ou do transmissor (*C*), expresso por:

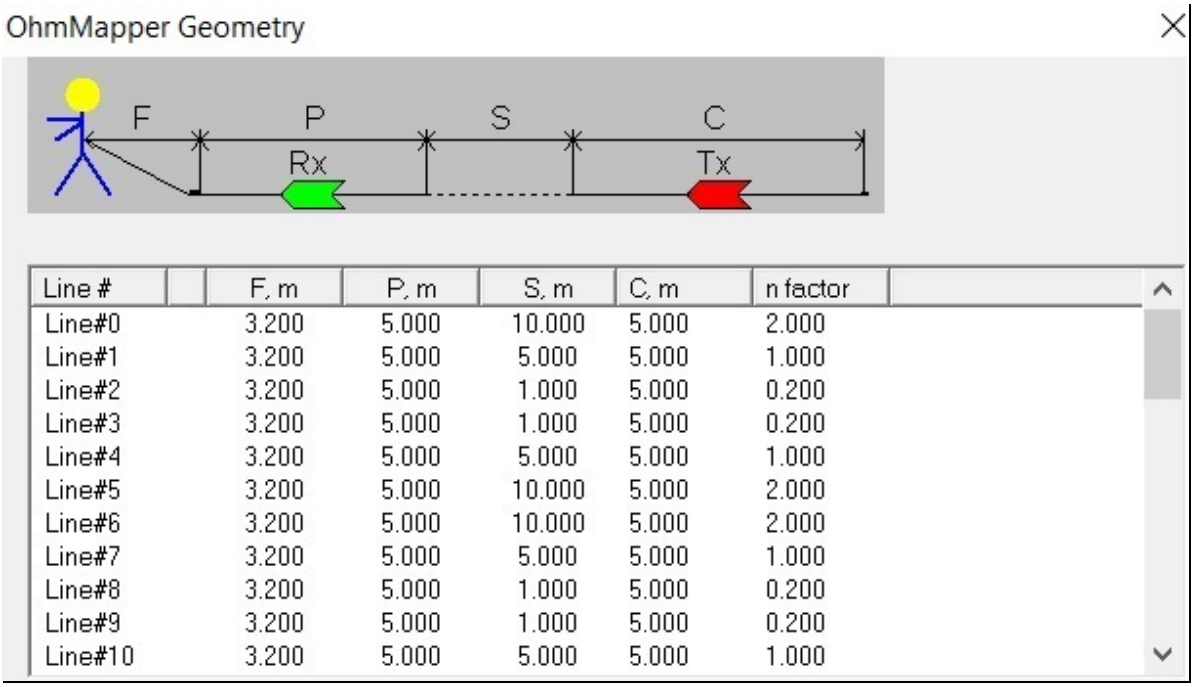
$$n = \frac{S}{P} \quad \textbf{(3.20)} \quad ou \quad n = \frac{S}{C} \quad \textbf{(3.21)},$$ onde $P = C$.

Desta maneira, por exemplo, adotado cabos capacitivos de 2,5 m, com comprimento total do dipolo de 5,0 m, e a corda que separa o transmissor do receptor de 10,0 m, este arranjo dipolo-dipolo possui um fator *n=2*, como pode ser visto mais adiante na planilha do programa de aquisição Magmap2000 (Figura 24).

Mantido esses mesmos cabos dipolos, mas com o aumento do comprimento da corda para 20,0 m para investigação mais profunda, o arranjo passará a ter um fator *n=4*.

Do contrário, com o mesmo comprimento do dipolo de 5,0 m e redução da corda para apenas 2,5 m para amostragens mais rasas, o arranjo terá então um fator *n=0,5*.

Figura 24 - Diagrama de comprimentos e planilha do programa Magmap2000.



Line #	F, m	P, m	S, m	C, m	n factor
Line#0	3.200	5.000	10.000	5.000	2.000
Line#1	3.200	5.000	5.000	5.000	1.000
Line#2	3.200	5.000	1.000	5.000	0.200
Line#3	3.200	5.000	1.000	5.000	0.200
Line#4	3.200	5.000	5.000	5.000	1.000
Line#5	3.200	5.000	10.000	5.000	2.000
Line#6	3.200	5.000	10.000	5.000	2.000
Line#7	3.200	5.000	5.000	5.000	1.000
Line#8	3.200	5.000	1.000	5.000	0.200
Line#9	3.200	5.000	1.000	5.000	0.200
Line#10	3.200	5.000	5.000	5.000	1.000

Fonte: Geometrics, 2001.

O exemplo da Figura 24 revela que o menor fator *n* calculado é um número fracionário igual a 0,2 (*n=0,2)*, o que não é possível para os arranjos dipolo-dipolo da Eletrorresistividade convencional galvânica, que utilizam apenas fatores de números inteiros (*n=1,2,3,4*....), como visto em seção anterior.

Este fato tem implicação na possibilidade ou não de utilização de programas comerciais para inversão de dados do *Ohmmapper* e na resolução (detalhamento) das pseudo-seções obtidas (GROOM, 2008), uma vez que alguns desses programas podem trabalhar com valores fracionários e inteiros do fator *n* (¼, ½, 1, 2, etc), como é o caso do Res2Dinv (LOKE, 2004) e ZondRes2D (KAMINSKIY, 2010). Por outo lado, outros programas podem restringir à inserção apenas de números inteiros (1, 2, 3, 4, etc), e, portanto, não processar dados oriundos da Resistividade Capacitiva.

No levantamento de dados dos perfis de Resistividade Capacitiva, também deve ser considerado que as medições do *Ohmmapper* são baseadas em disparos do sinal em intervalos regulares de tempo (GEOMETRICS, 2001) e, para que as amostragens ao longo da linha realizada sejam equidistantes, necessariamente, a velocidade de levantamento não deve variar.

Tal condição é importante quando, posteriormente, são utilizados os programas de inversão para processamento dos dados obtidos, tais como os já citados Res2Dinv ou ZondRes2D, e que necessitam de uma distribuição uniforme das medições ao longo do perfil realizado para interpolação dos valores.

A fim de obter esta distribuição uniforme, o programa de aquisição e edição dos dados, Magmap2000, calcula a média dos dados obtidos para uma menor unidade de espaçamento, indicada por seu termo em inglês "*Smallest Unit Electrode Spacing*" (GEOMETRICS, 2001). Assim, este espaçamento é o menor intervalo de interpolação possível de uso para calcular um valor médio e é determinado pelo denominador comum das cordas de separação ou relacionado aos comprimentos de dipolo.

Por exemplo, adotadas cordas de separações de 5,0; 10,0 15,0 e 20,0 metros, o máximo divisor comum é 5,0, visto ser este o menor intervalo de distância para cálculo de médias. Caso as medidas fossem executadas a cada 0,8 m por exemplo, existiriam pelo menos seis dados num espaço de 5,0 metros para serem calculados os valores médios deste trecho.

Entretanto, utilizadas separações que não fossem de comprimentos regulares ou múltiplas, a menor unidade de espaçamento para interpolação seria um número decimal e de valor reduzido, o que obrigaria o levantamento de campo ser executado num intervalo de amostragem muito pequeno, gerando uma grande quantidade de dados que o programa de inversão poderia ter dificuldade em processar.

Por outo lado, caso a unidade de espaçamento de interpolação for muito pequena e os dados de campo não tiverem sido coletados em intervalos reduzidos, os programas de inversão são induzidos a emularem amostragens de grande detalhamento, o que pode falsear os verdadeiros contornos das feições presentes em subsuperfície.

No manual do *Ohmmapper* modelo *TR1* (GEOMETRICS, 2001), o fabricante indica a utilização de comprimentos das cordas de separação de 5,0; 7,5; 10,0; 12,5 metros como prática normal e cujos fatores *n* são frações binárias do comprimento do dipolo de 5,0 metros, a saber: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0.

Porém, a adoção dessas separações é adequada para alvos pouco mais profundos, algo que muitas vezes não é objetivo de um determinado levantamento, como por exemplo a detecção de dutos subterrâneos rasos, que necessita de um detalhamento em níveis mais superficiais com distância menores entre o transmissor e o receptor, consequentemente, com valores mais reduzidos do fator *n*.

Decorrente das observações anteriores para um comprimento de dipolo de 5,0 metros, os valores do fator de proporcionalidade *n* obedecem a uma sequência de fração binária, sendo deduzido matematicamente para os níveis teóricos de investigação N=1, 2, 3, 4, 5... pela lei de formação $a_N = \frac{1}{2}\left(\frac{N}{2}\right) = \left(\frac{N}{4}\right)$, o que resulta nos seguintes valores binários do fator *n*: 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75; 2,00; 2,25; 2,50; 2,75; 3,00; 3,25; 3,50; 3,75; 4,00...

Desta forma, para as separações entre transmissor e receptor mais adequadas ao melhor processamento de dados pelos programas de inversão, os números da sequência binária anterior do fator *n* devem ser multiplicados pela extensão do dipolo, comumente de 5,0 metros, o que resulta na tabela orientativa a seguir que apresenta os comprimentos recomendados das cordas do *Ohmmapper* a serem adotados nos levantamentos de campo (Tabela 2) e as distâncias resultantes entre os centros dos dipolos transmissor e receptor.

Tabela 2 - Fator *n* e comprimento das cordas para dipolo de extensão 5,0 m.

Fator *n* (Fração Binária)	Comprimento das cordas (*S*)	Distância entre os centros dos dipolos	Fator *n* (Fração Binária)	Comprimento das cordas (*S*)	Distância entre os centros dos dipolos
0,25	1,25 m	6,25 m	**2,25**	11,25 m	16,25 m
0,50	2,50 m	7,50 m	**2,50**	12,50 m	17,50 m
0,75	3,75 m	8,75 m	**2,75**	13,75 m	18,75 m
1,00	5,00 m	10,00 m	**3,00**	15,00 m	20,00 m
1,25	6,25 m	11,25 m	**3,25**	16,25 m	21,25 m
1,50	7,50 m	12,50 m	**3,50**	17,50 m	22,50 m
1,75	8,75 m	13,75 m	**3,75**	18,75 m	23,75 m
2,00	10,00 m	15,00 m	**4,00**	20,00 m	25,00 m

Fonte: Autoria própria.

Assim, para garantir uma maior resolução das feições a serem investigadas em subsuperfície com dipolo de comprimento de 5,0 metros, é recomendável a adoção em campo dos comprimentos de cordas de acordo à tabela anterior. Algumas dessas separações ou a combinação delas dependerá dos objetivos e da profundidade do

alvo, embora desconsiderado aqui os efeitos restritivos do parâmetro *skin depth* para as maiores distâncias apresentadas.

Analogamente, considerada a utilização de um dipolo capacitivo de extensão de 10,0 metros do *Ohmmapper*, referente a outra dimensão oferecida pelo equipamento modelo *TR1*, o comprimento recomendável das cordas, neste caso, será duas vezes o apresentado na tabela anterior na coluna “Comprimento das cordas (*S*)”.

- 3.6.2. Plotagem das medidas de Resistividade Capacitiva

Uma discussão importante referente à aquisição de dados pela aplicação do imageamento de Resistividade Capacitiva com o *Ohmmapper* corresponde à definição do ponto de medida de resistividade elétrica em subsuperfície para interpolação dos dados e geração das pseudo-seções.

A importância da determinação mais precisa dos pontos de medição no arranjo dipolo-dipolo no imageamento capacitivo é muito significativa, principalmente, quando investigado o posicionamento em subsuperfície de corpos de dimensão reduzida, tais como dutos subterrâneos, que será tema de ensaio controlado desta pesquisa a ser apresentado mais adiante.

Nas abordagens anteriores aqui descritas, de modo geral, são observadas similaridades conceituais entre o arranjo dipolo-dipolo da Eletrorresistividade galvânica convencional e da Resistividade Capacitiva empregando-se o *Ohmmapper* como indicado por Kuras (2002).

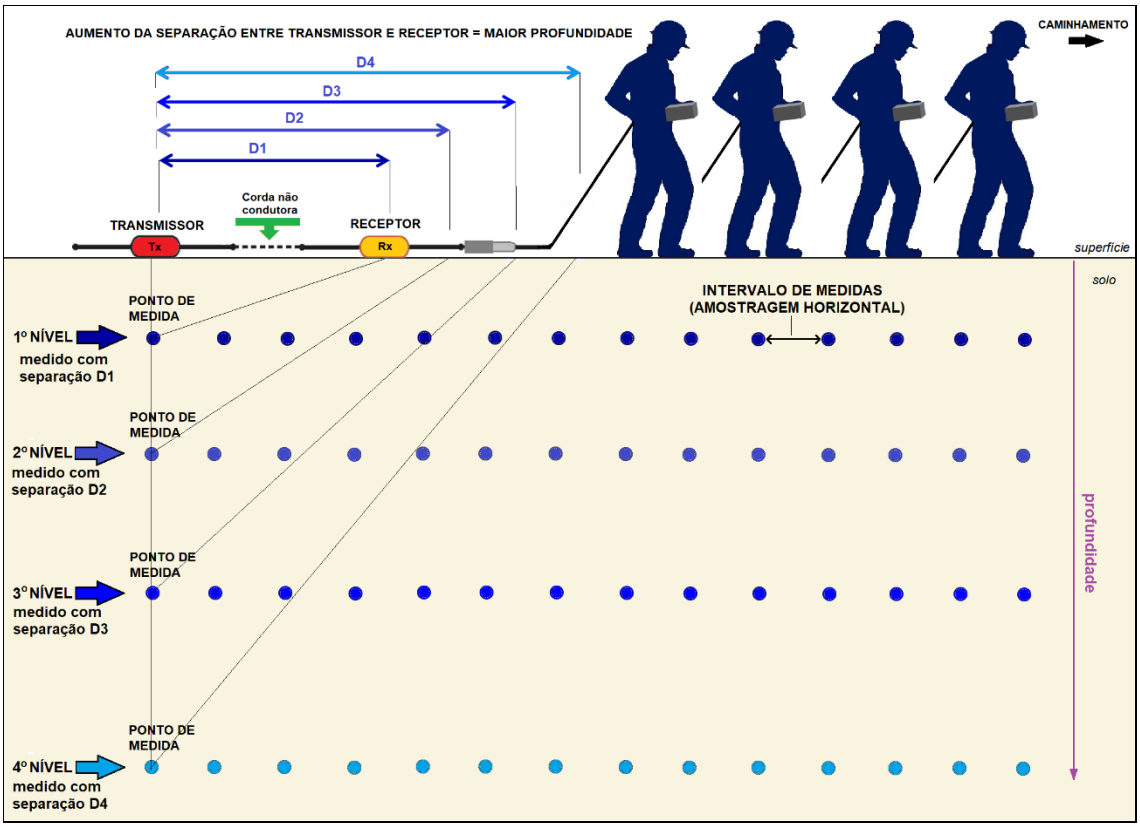
Entretanto, existem algumas particularidades que indicam que seus parâmetros geométricos não são absolutamente idênticos como foi constatado nas descrições mais detalhadas sobre a relação entre os fatores geométricos K_{dd} e K_{LA} (seção 3.5.) ou mesmo na definição do fator de proporcionalidade *n* de separação entre o transmissor e receptor na forma de frações binárias ou não.

Em face das diferenças dos parâmetros geométricos desses arranjos dipolo-dipolo, é presumível que os pontos de plotagem da resistividade elétrica medida não devam ser os mesmos para esses dois métodos, o que também é influenciado pelo

comportamento físico distinto do método de Resistividade Capacitiva quanto à geração das correntes elétricas para a subsuperfície através da variação do campo magnético, descrito na seção 3.5.

Assim, como forma de visualização da plotagem das leituras de resistividade elétrica no imageamento de resistividade capacitiva é apresentado o diagrama a seguir (Figura 25), onde é verificado que o ponto de medida se posiciona abaixo do centro do conjunto transmissor e ao longo de um mesmo perfil de medições no nível de investigação determinado pela separação entre o transmissor e o receptor.

Figura 25 - Pontos de medidas em diferentes níveis para o Ohmmapper.



Fonte: Autoria própria.

Um dos aspectos que corroboram com a assertiva de plotagem da resistividade elétrica abaixo do centro do dipolo transmissor é observado durante a aquisição de dados em campo com o equipamento *Ohmmapper*. Ao interceptar alguma estrutura conhecida em subsuperfície pela unidade transmissora, é perceptível na tela deste instrumento a alteração da forma do sinal elétrico recebido (Figura 26) justamente quando o ponto central do transmissor está acima do objeto em questão.

Figura 26 - Traço do sinal elétrico visualizado na tela do Ohmmapper.

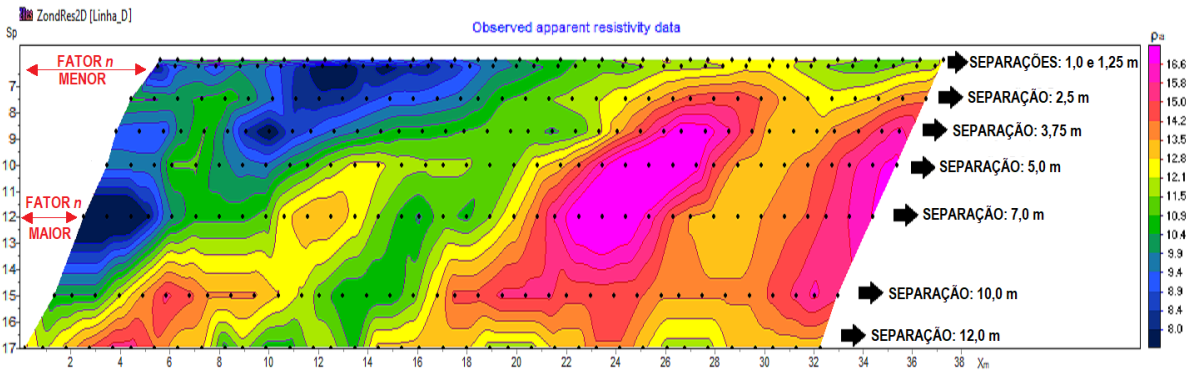


Fonte: Adaptado de Geometrics, 2001.

Deve ser considerado também, como visto anteriormente e apontado por McNeill (1980), que as correntes elétricas no regime *quasi-estático*, onde opera o equipamento *Ohmmapper*, são produzidas pela variação de campo magnético (indução eletromagnética) no posicionamento do conjunto transmissor para emissão em subsuperfície.

Outro exemplo que confirma que os pontos de medida em subsuperfície com o *Ohmmapper* ocorre abaixo do dipolo transmissor pode ser verificado na pseudo-seção de dados brutos obtidos da Figura 27, utilizado o programa ZondRes2D (KAMINSKIY, 2010), versão 5.2, onde estão plotadas as resistividades elétricas observadas em campo e que é coerente ao diagrama da Figura 25.

Figura 27 – Pseudo-seção com diversas separações dos dipolos.



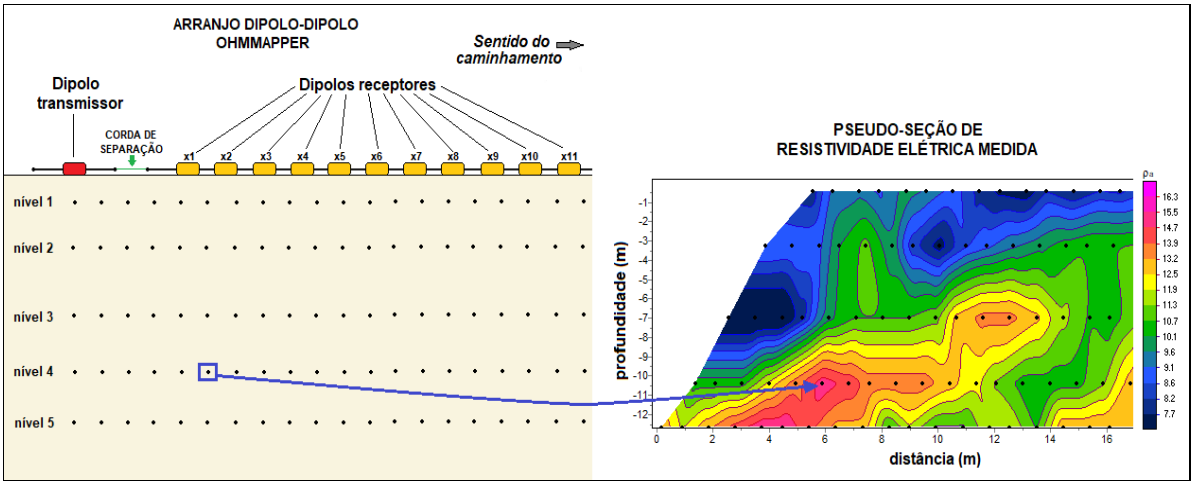
Fonte: Autoria própria.

Conforme visto na Figura 27, há um efeito de distorção na imagem dos dados medidos causada por relações geométricas entre as grandezas do arranjo de campo, ou seja, quanto menor o valor do fator *n* (menor separação entre os transmissor e receptor) maior será o afastamento do ponto de plotagem da medida do eixo vertical da pseudo-seção.

Posteriormente, esta distorção da seção em forma de “paralelogramo”, é corrigida quando obtida a seção modelada após o final do processamento e inversão de dados, como será visto mais a frente em outras seções de resistividade elétrica nesta pesquisa.

Deste modo, a plotagem do arranjo dipolo-dipolo na pseudo-seção de dados brutos do *Ohmmapper*, que pode ser vista a seguir na Figura 28, diverge daquela da Eletrorresistividade galvânica, apresentada na Figura 12, que define o ponto de medida em profundidade na intersecção de uma projeção de 45º a partir dos centros dos dipolos transmissor e receptor, como reportado em tópico anterior.

Figura 28 - Plotagem de medidas na pseudo-seção de Resistividade Capacitiva.



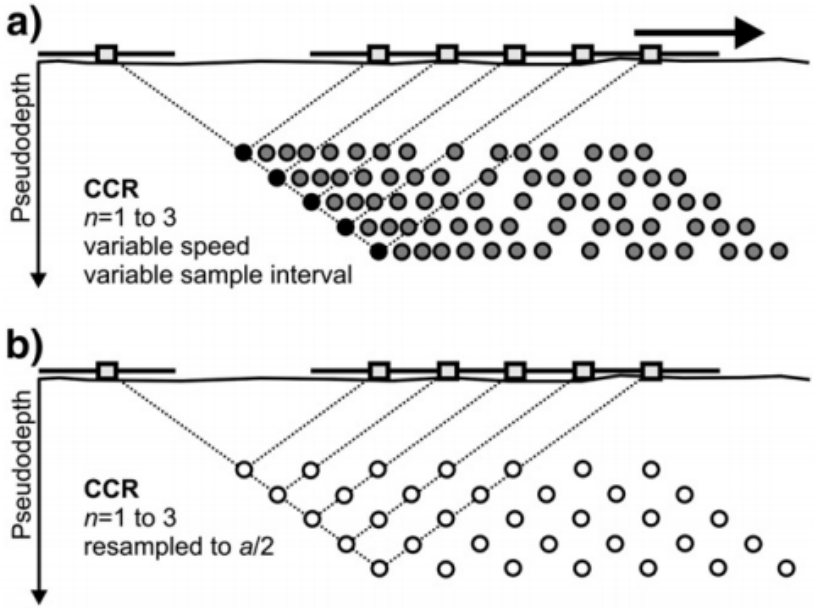
Fonte: Autoria própria.

Para que não haja incorreção na plotagem dos dados adquiridos, reitera-se que as considerações aqui discutidas correspondem à aquisição com o equipamento *Ohmmapper*, que trabalha com linhas de antenas capacitivas, e não ao instrumento Corim, que opera com placas capacitivas e arranjo dipolo-dipolo diferente.

Um exemplo deste tipo de equívoco é verificado no artigo de Oldenborger & LeBlanc (2013) para análise e discussão de amostragem de dados, que utilizaram o

Ohmmapper em suas medições e adotaram a plotagem dos pontos de medidas com intersecção em profundidade a 45º, similar à pseudo-seção do arranjo dipolo-dipolo da Eletrorresistividade galvânica, como visto na figura a seguir (Figura 29).

Figura 29 - Plotagem incorreta de pontos de medidas para o Ohmmapper.



Fonte: Oldenborger & LeBlanc, 2013.

Merece destaque que o sistema capacitivo *Corim* é aquele que, na verdade, possui uma aquisição de dados semelhante ao do arranjo dipolo-dipolo da Eletrorresistividade galvânica em função da geometria do arranjo de campo de suas placas capacitivas transmissora e receptora, posicionadas transversalmente ao perfil (Figura 13), na forma equatorial, e não o equipamento *Ohmmapper* como foi indicado no artigo de Oldenborger & LeBlanc (2013).

3.7. Processamento de dados e interpretação

Antes de descrever os procedimentos de tratamento de dados e modelamento adotados nesta pesquisa, é importante assinalar que este processo está inserido na abordagem metodológica denominada de problema inverso, onde são aplicados processos matemáticos para estimar a distribuição de determinada propriedade física em subsuperfície a partir de medidas geofísicas de campo, e que são representadas, neste trabalho, pelas resistividades elétricas obtidas (KEAREY et al., 2013).

Neste caso, a inversão descreve o processo numérico onde os valores reais da propriedade física (parâmetro procurado) são determinados com base em critérios numéricos-estatísticos de melhor ajuste entre os dados medidos em campo e os dados do modelo calculado (preditivo), com o objetivo de minimizar a diferença média entre eles, denominada de raiz quadrada média, do inglês *root mean square* (*RMS*), requerido para isto o uso de procedimentos iterativos através de programas de inversão e modelamento (LOKE, 2004).

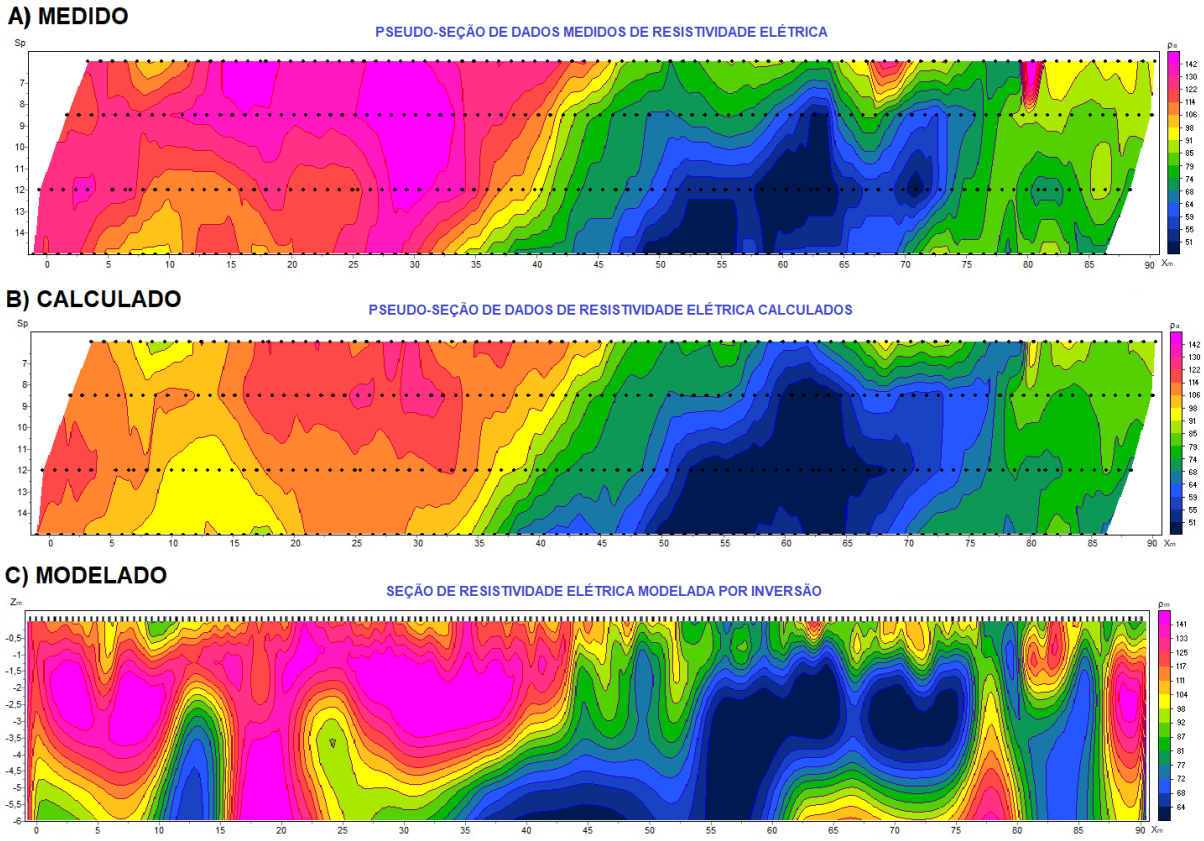
Portanto, de acordo com Gasperikova *et al.* (2012), para cálculo da raiz quadrada média (*RMS*) numa inversão de dados e modelamento de uma seção de resistividade elétrica, a fórmula utilizada será:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{d_i^{calc} - d_i^{med}}{d_i^{med}}\right)^2}{N}} \quad \text{x } 100 \qquad \textbf{(3.22)},$$

onde N é o número total de pontos de dados, d_i^{calc} e d_i^{med} são os valores calculados e os valores medidos, respectivamente, do ponto de dados i.

Assim, para esta pesquisa, foram utilizados os programas de inversão de dados de resistividade elétrica Res2Dinv, versão 3.54 (LOKE, 2004), e ZondRes2D, versão 5.2 (KAMINSKIY, 2010), os quais permitiram a elaboração de pseudo-seções preliminares e seções finais por meio de procedimentos iterativos para representação da distribuição lateral e em profundidade dos valores de resistividade e úteis para a interpretação posterior das feições estimadas numa determinada linha geofísica executada, como pode ser visto nas pseudo-seções de dados medidos e calculados e da seção modelada da Figura 30.

Figura 30 - Pseudo-seções de dados medidos e calculados e seção modelada.



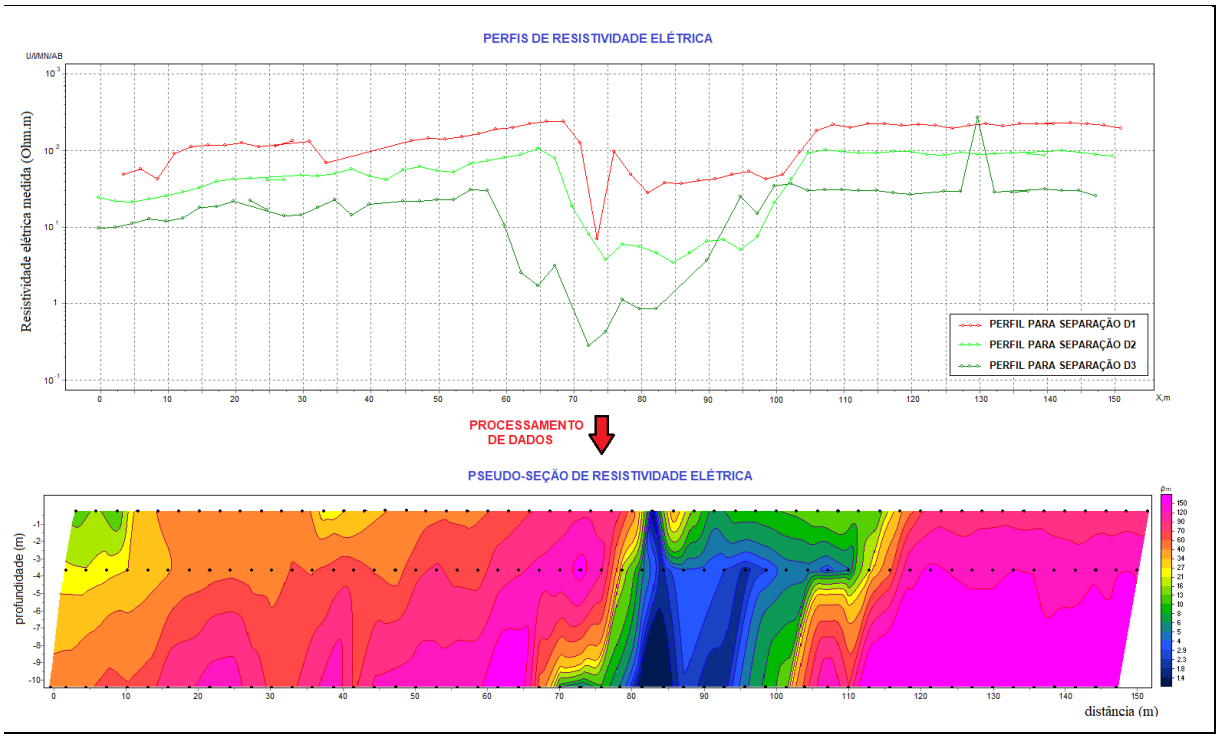
Fonte: Autoria própria.

Na fase interpretativa, a qualidade dos modelos obtidos no processamento de dados pelo uso dos programas de inversão deve ser a mais realista possível do ponto de vista dos materiais geológicos existentes em subsuperfície e, também, referentes às feições de caráter ambiental associadas à contaminação subterrânea. Desta forma, a interpretação será mais precisa quanto maiores informações possam ser disponibilizadas sobre o caso avaliado.

No processamento, os dados oriundos dos perfis de uma mesma linha de levantamento com separações e níveis distintos de amostragem são agrupados, editados e convertidos em resistividade aparente conforme seus posicionamentos e profundidades por meio do programa Magmap2000 (GEOMETRICS, 2001), bem como transformados em formatos padrões compatíveis com os diferentes programas comerciais de inversão de dados de resistividade elétrica de corrente contínua (CC) para posterior geração de pseudo-seções e de modelamento geofísico.

Assim, decorrente deste processo, a configuração inicial dos dados adquiridos e sua forma resultante podem ser visualizadas a seguir na Figura 31, que descreve a conversão dos perfis originais e individuais de resistividade elétrica (1D) em pseudo-seção de dados brutos interpolados (seção 2D), a qual apresenta as faixas de variações de resistividade para as diferentes porções de subsuperfície ao longo da linha de levantamento executado.

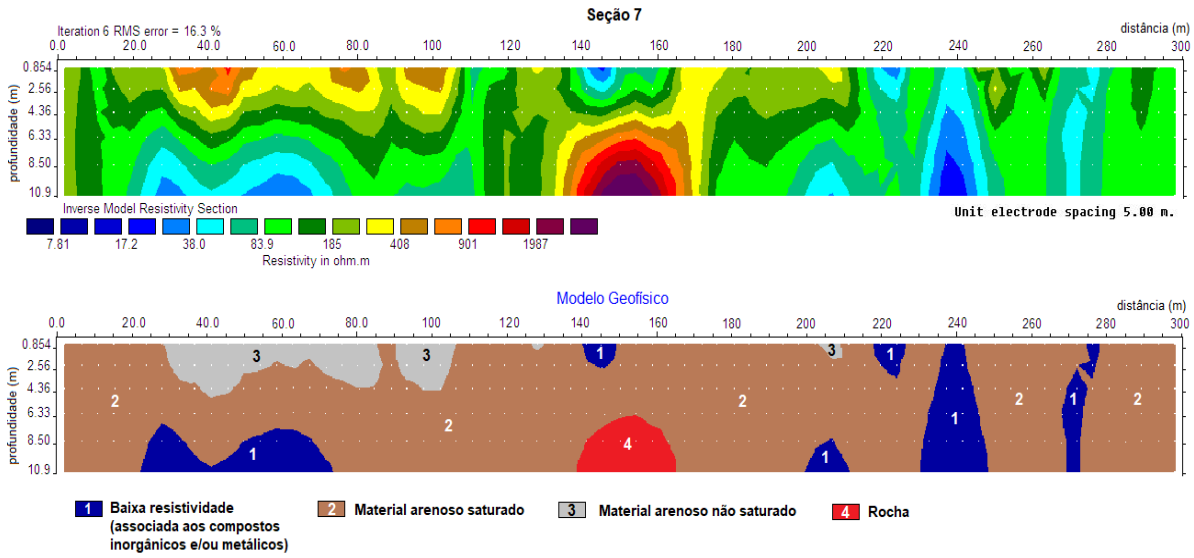
Figura 31 - Conversão de dados de resistividade elétrica em pseudo-seção.



Fonte: Adaptado de Geometrics, 2001.

O resultado final do tratamento de dados são seções obtidas por processos iterativos em programas de inversão onde são apresentados os valores das resistividades elétricas, tanto na sua magnitude, como na sua posição espacial (horizontal e em profundidade), que possibilitam a elaboração de modelos geofísicos através das interpretações das feições geológicas, ou ambientais, de acordo às faixas de resistividades identificadas, como observado no exemplo da Figura 32.

Figura 32 - Seção de resistividade elétrica e modelo de inversão.



Fonte: Autoria própria.

Segundo Loke (2004), no processo de interpretação das seções, é comum a ocorrência de valores de resistividade elétrica desde poucas unidades até milhares de ohm.m, de acordo com as variações dos materiais presentes em subsuperfície, naturais ou não, como pode ser observado nos dados da Tabela 1, onde constam as resistividades de materiais e potenciais contaminantes, com especial atenção aos baixos valores apresentados pelos elementos inorgânicos e metálicos e pelos valores mais elevados referentes aos compostos orgânicos.

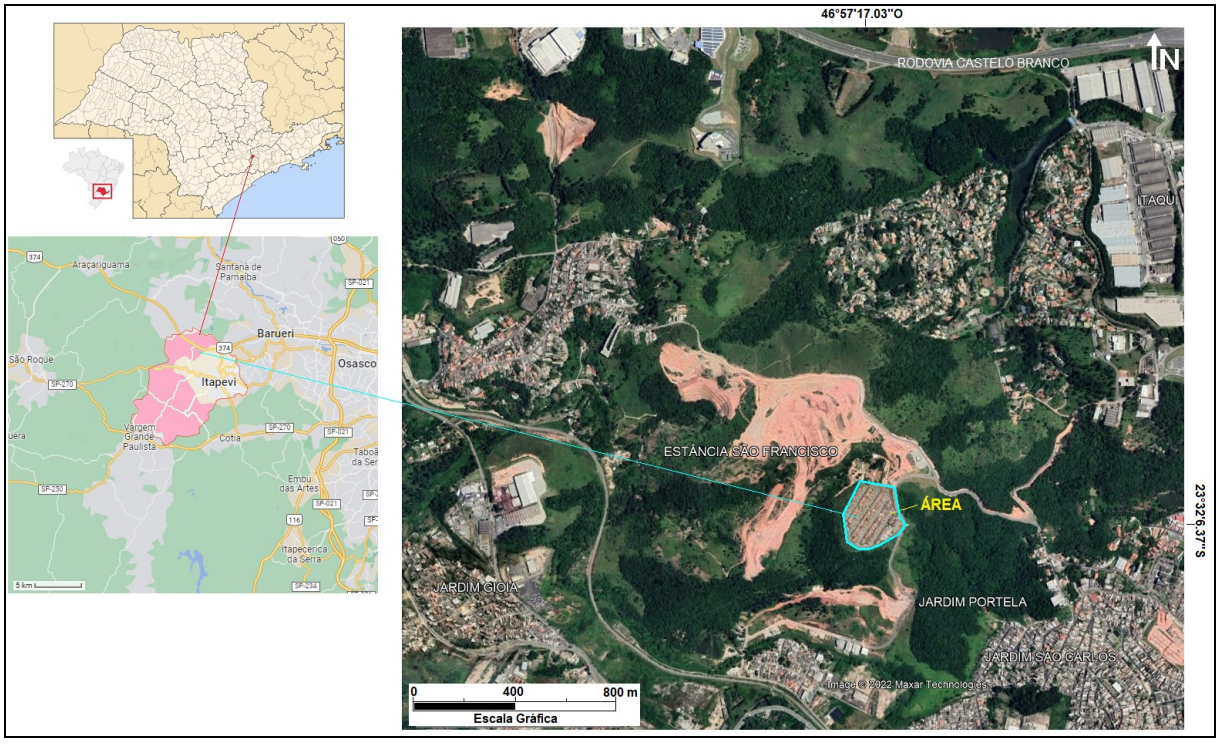
4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Antes da apresentação de casos de aplicação ambiental para investigação da presença de contaminantes orgânicos ou inorgânicos em subsuperfície, foram realizados ensaios controlados em local previamente selecionado. A adoção deste tipo de ensaio decorreu da necessidade de aferir o comportamento das resistividades elétricas de corpos ou feições subterrâneas em situações reais e sob condições de subsuperfície conhecidas, com nenhuma modificação no terreno por escavações ou aterramentos para não se alterar as propriedades originais do ambiente a ser investigado e para que os dados obtidos fossem ao máximo representativos e confiáveis.

O objetivo destes foi avaliar a influência dos parâmetros de amostragem e aquisição de dados, além de serem executados testes relacionados aos limites de comunicação de sinal elétrico entre os conjuntos transmissor e receptor do equipamento *Ohmmapper* para aprofundamento do conhecimento sobre a metodologia de Resistividade Capacitiva e domínio de seus preceitos teóricos e práticos.

Os ensaios geofísicos foram realizados em local a cerca de 1,7 km ao sul da Rodovia Presidente Castelo Branco, no município de Itapevi, estado de São Paulo, especificamente num condomínio residencial com arruamento de pavimento asfáltico, em região topograficamente elevada, com cota da ordem de 884,0 m de altitude (Figura 33).

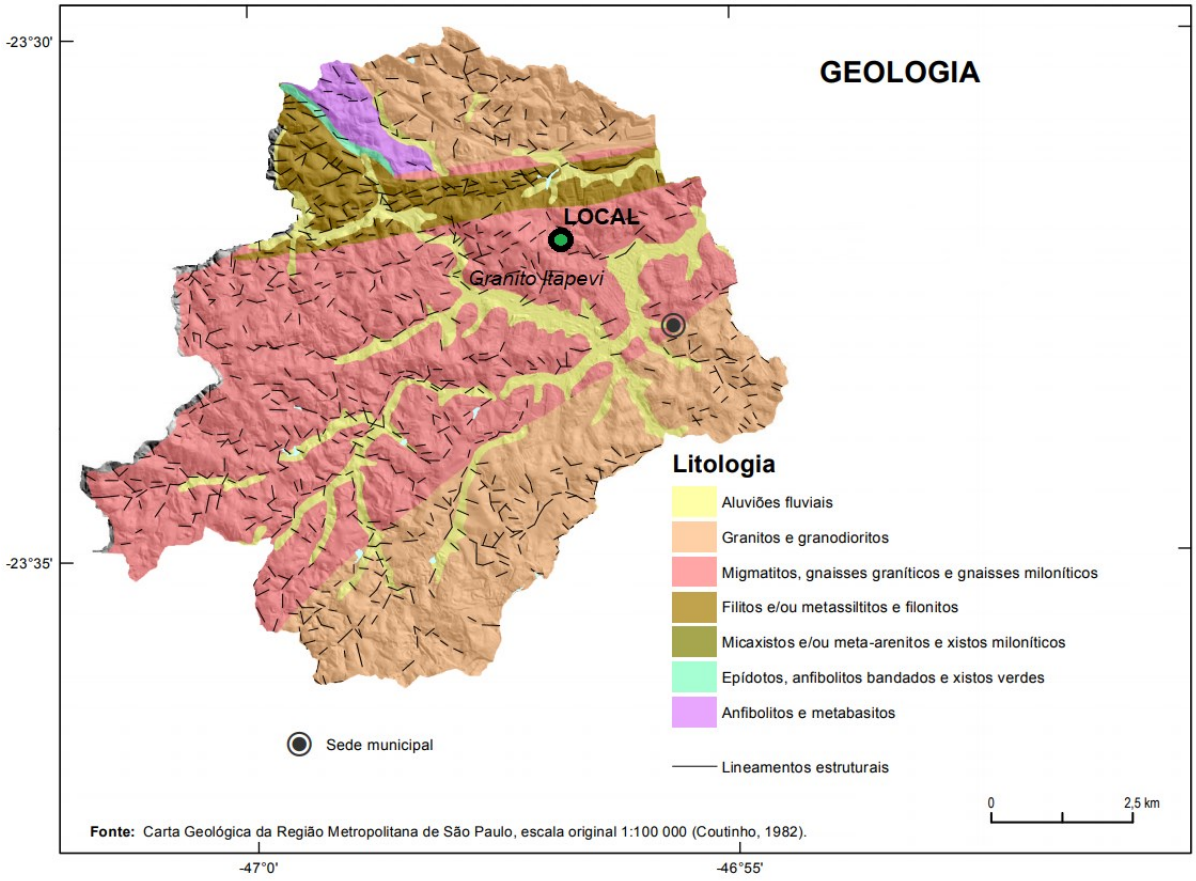
Figura 33 - Localização da área de ensaios-teste.



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2022.

Predominantemente, o solo local é formado por material argilo-arenoso, resultado da decomposição da rocha presente na região, que, de acordo com Coutinho (1982), são os granitoides do denominado Granito Itapevi (Figura 34).

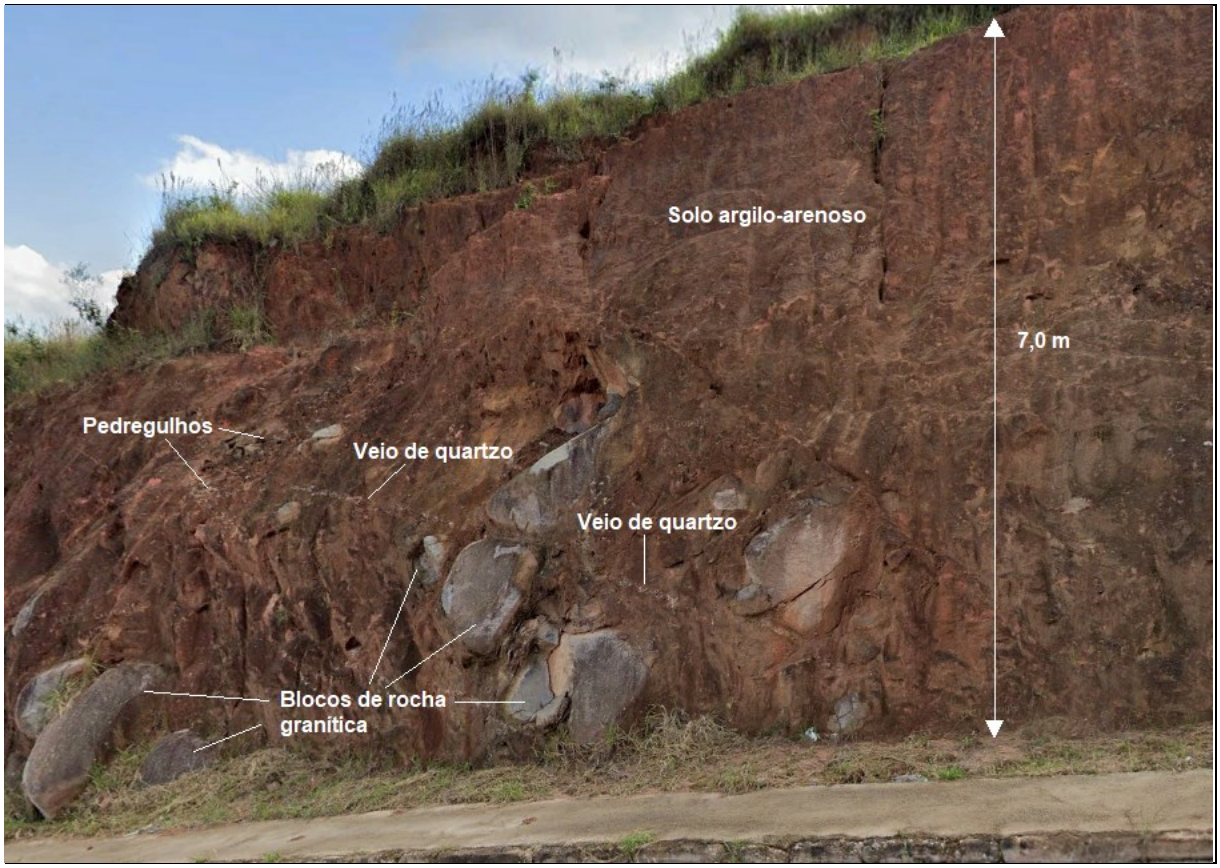
Figura 34 - Geologia da região dos ensaios-teste.



Fonte: Adaptado de Coutinho, 1982.

Em corte da estrada próximo à entrada do condomínio em questão, é possível visualizar algumas feições representativas da geologia do local e de suas heterogeneidades, apresentadas na Figura 35 e onde estão anotados o solo argilo-arenoso em nível superior e, numa porção menos intemperizada mais abaixo, blocos de rocha granítica, veios de quartzo e pedregulhos.

Figura 35 – Feições geológicas identificadas em corte próximo ao condomínio.



Fonte: O autor.

4.1. Primeiro ensaio: distância máxima de captação do sinal emitido

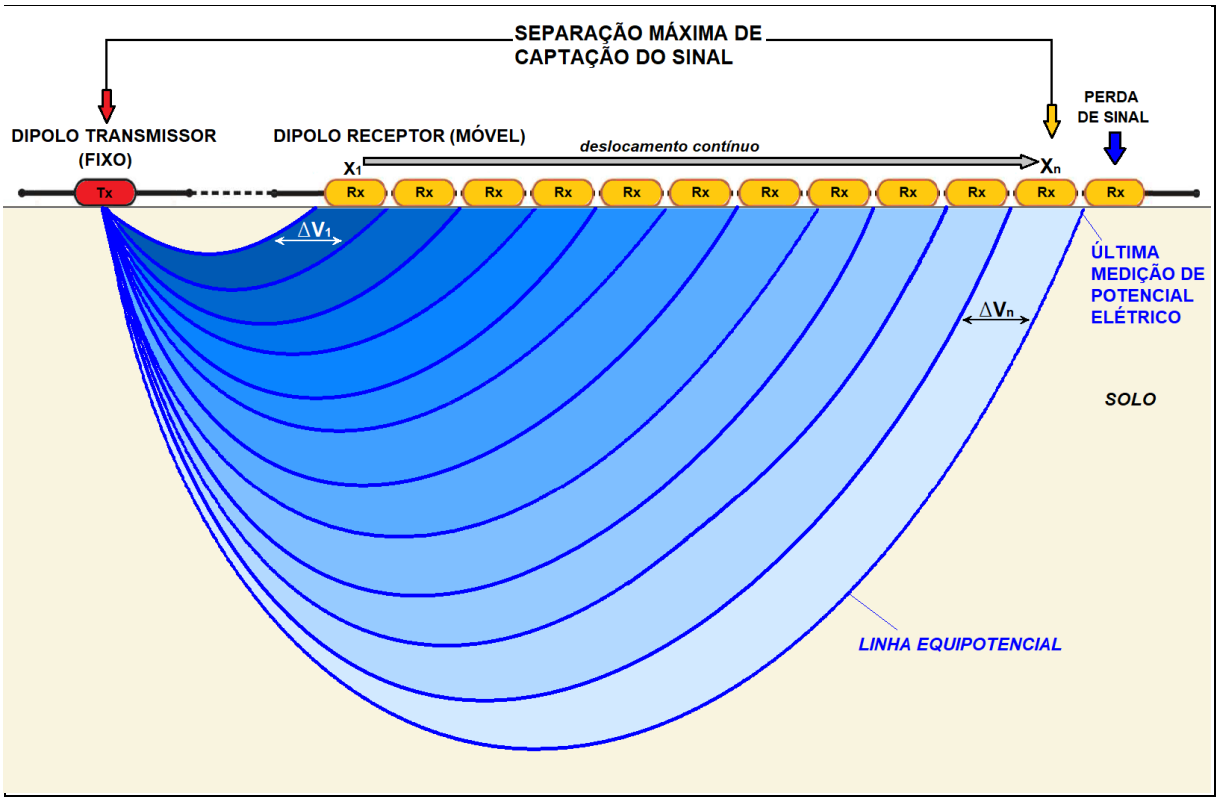
Conceitualmente, este ensaio antecede o levantamento de campo e visa aferir a capacidade de transmissão do sinal em relação à separação máxima entre o transmissor e receptor através da determinação do maior comprimento permitido da corda a ser utilizada, algo muito importante quando o terreno for condutivo eletricamente (baixa resistividade) ou se não houver nenhuma informação geológica local.

Embora a profundidade da investigação seja exclusivamente determinada pela geometria do arranjo de campo dipolo-dipolo, na prática, conforme Geometrics (2001), a amplitude do sinal transmitido diminui drasticamente à medida que as distâncias transmissor-receptor aumentam, e caso esta separação seja maior que o *skin depth*, não há sinal suficiente para ser detectado pelo receptor.

A fabricante do equipamento *Ohmmapper* propõe a execução de teste de medidas para a determinação do maior afastamento transmissor-receptor, num arranjo onde o dipolo transmissor permanece fixo e o dipolo receptor posicionado em distâncias gradativamente maiores de acordo com as dimensões das cordas, por exemplo, 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 15,0 e 20,0 metros, etc, até a separação onde o receptor não captará o sinal emitido pelo transmissor, com recomendação em adotar para o local em questão comprimentos menores que este limite (GEOMETRICS, 2001).

Entretanto, nesta pesquisa, foi adotada uma adaptação do arranjo proposto pela Geometrics e mantido fixa a posição do dipolo transmissor, mas com movimento contínuo do dipolo receptor, similar à realização do arranjo *WARR (wide angle reflection and refraction)* do método *GPR* (DAVIS & ANNAN, 1989). As medições foram efetuadas em disparo por tempo a cada 1,0 s para coleta de maior quantidade de dados e maior amostragem das distâncias, com intuito de determinar com maior precisão a separação limite onde o potencial elétrico já não seria mais detectado (Figura 36).

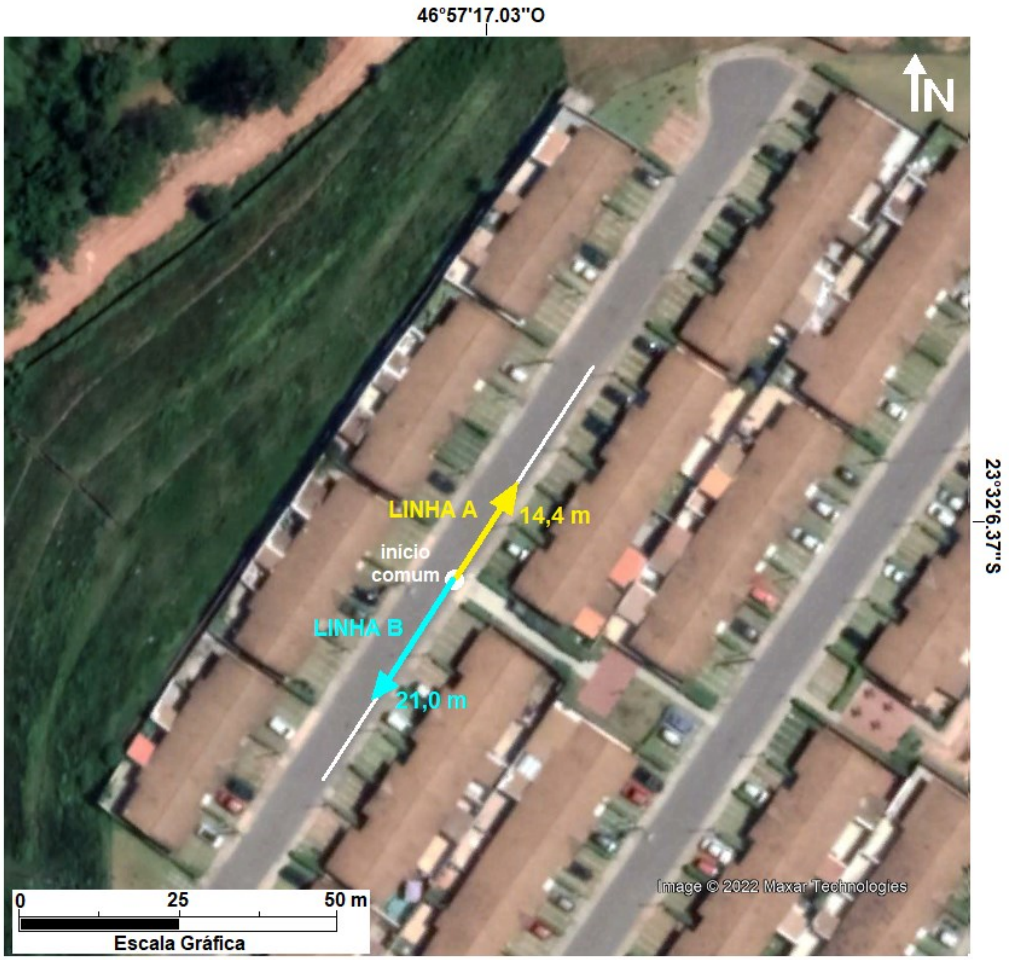
Figura 36 - Diagrama para determinação de separação máxima dos dipolos.



Fonte: Autoria própria.

Neste ensaio, foram realizadas duas linhas-teste em sentidos opostos (Linhas A e B) partindo do mesmo ponto inicial para a aferição de eventual heterogeneidade do ambiente geológico nos diferentes flancos (Figura 37), tendo cada perfil um comprimento individual de 38,0 m para cada lado, e para determinação da separação máxima de comunicação entre o dipolo transmissor e o receptor.

Figura 37 - Localização das linhas para aferição de captação de sinal emitido.

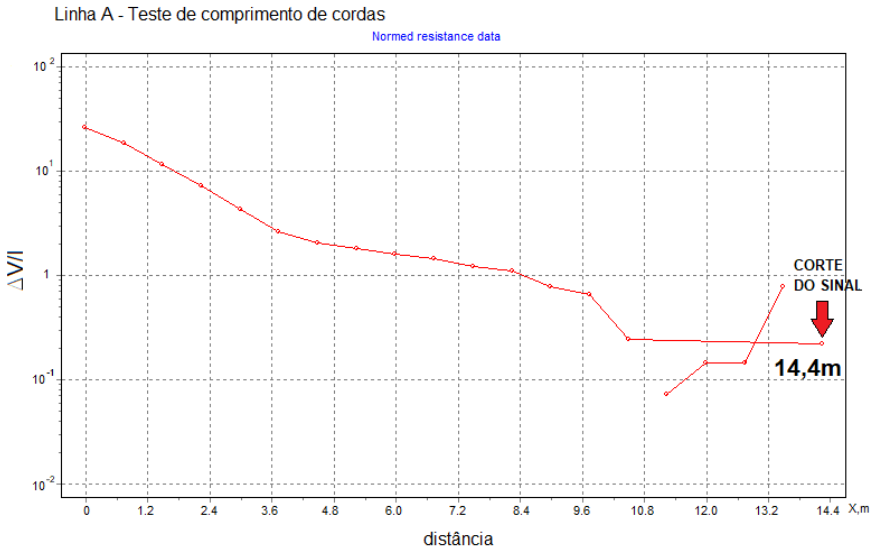


Fonte: Adaptado de Google Earth, 2022.

Como resultado deste ensaio, foi observado em campo que os sinais elétricos nas linhas realizadas haviam sido interrompidos em determinadas distâncias de corte e que foram registradas, sendo os perfis continuados até o comprimento máximo previsto de 38,0 m para certificação de perda definitiva de recepção.

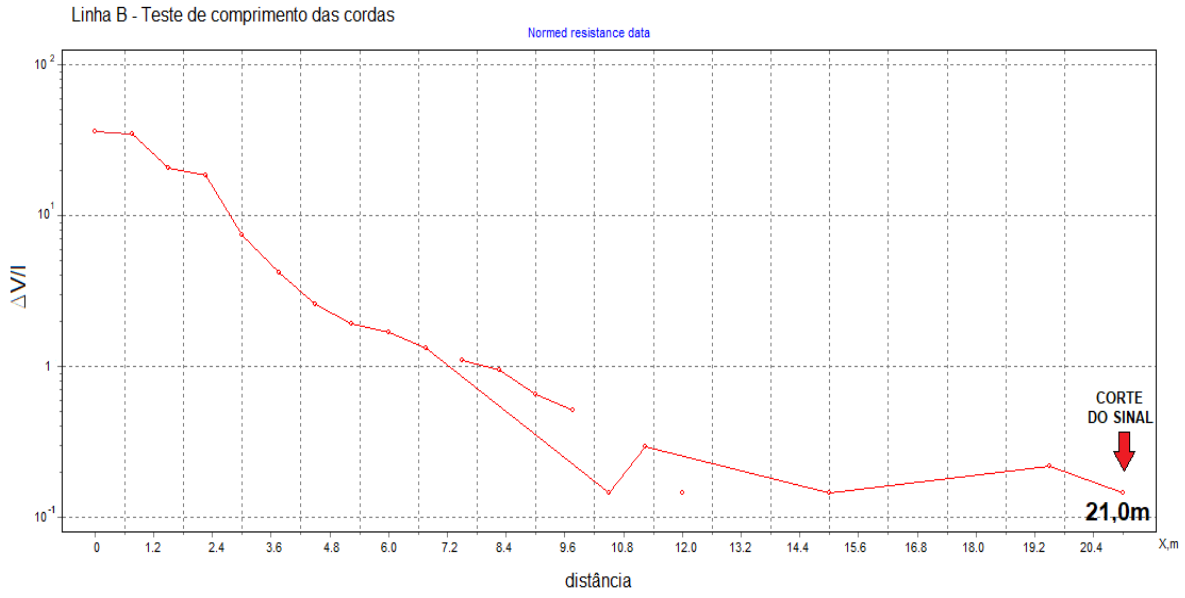
Os resultados deste teste são apresentados a seguir nos gráficos do programa ZondRes2D (KAMINSKIY, 2010) e que exprimem o decréscimo de intensidade da relação *ΔV/I* desde o ponto de maior proximidade entre o transmissor e receptor até o ponto de maior afastamento e perda total de comunicação (Figuras 38 e 39).

Figura 38 - Perfil da linha A do teste de separação transmissor-receptor.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 39 - Perfil da linha B do teste de separação transmissor-receptor.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os gráficos anteriores mostram a perda de sinal na distância de 14,4 m para a Linha A (Figura 38) e 21,0 m para a Linha B (Figura 39), o que indica uma certa heterogeneidade em razão das diferenças de resistividade elétrica entre esses dois lados. Neste caso, o menor valor de distância de perda observado para a Linha A aponta que a resistividade elétrica média é menor (maior condutividade) que a do lado B, cuja distância constatada de interrupção do sinal é maior.

Em realidade a captação do sinal é interrompida quando a relação *ΔV/I* é igual a zero, isto porque, apesar de haver a injeção de corrente elétrica no ponto fixo do transmissor, sua atenuação é tão grande na distância acima do *skin depth* onde está o receptor móvel que o potencial elétrico não pode ser medido. Nesta condição, é assumido um valor nulo e sem leitura para cálculo de resistividade elétrica.

Quanto à determinação do comprimento máximo da separação entre as extremidades do dipolo transmissor e do receptor, de forma mais conservadora, é recomendada a adoção do menor valor obtido no ensaio, que no caso foi de 14,4 m, ou seja, todas as extensões de cordas a serem utilizadas para investigação do local devem ser obrigatoriamente menores que esta medida para garantir a realização de medições de potencial elétrico e cálculo das respectivas resistividades.

Após a determinação da distância de perda do sinal, é possível calcular a resistividade elétrica média para cada um dos dois lados amostrados por meio da equação 3.15, apresentada na seção 3.5., para a determinação do parâmetro *skin depth* ($d = 15{,}9\sqrt{\frac{\rho}{f}}$).

Desta maneira, considerada a frequência de emissão do *Ohmmapper* de 16,5 kHz, é obtida a resistividade elétrica para o lado A de 13,5 ohm.m e a resistividade de 28,8 ohm.m para o lado B, que indica uma certa heterogeneidade no solo local em decorrência de supostas diferenças de maior e menor teor de argila, respectivamente, entre esses dois flancos.

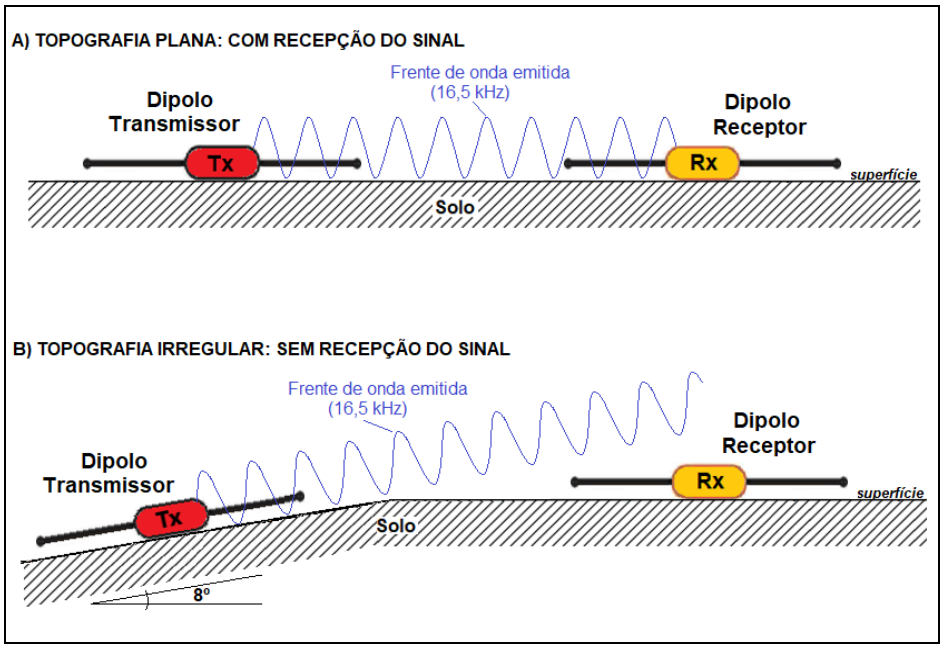
4.2. Segundo ensaio: ausência de recepção do sinal elétrico emitido

Nos testes realizados nesta pesquisa, algumas vezes foi constatada a perda de sinal elétrico entre o conjunto transmissor e o conjunto receptor, algo que impediu a aquisição de medidas de resistividade elétrica em determinados pontos específicos, mesmo obedecido o limite máximo de distância do transmissor e o receptor dado pelo *skin depth*, como visto anteriormente.

Desta maneira, avaliada as possíveis causas de interferência na aquisição de dados em campo, concluímos que esta perda de sinal decorre, basicamente, de dois motivos distintos que são o desnivelamento entre os planos do transmissor em relação ao do receptor e a proximidade com objetos metálicos não massivos, os quais serão discutidos na sequência.

Como aqui apontado, a primeira causa verificada de perda de sinal é provocada por desnivelamento do dipolo transmissor em relação ao dipolo receptor em função de irregularidades da superfície do terreno, naturais ou não, como por exemplo pequenas desconformidades na topografia do solo local ou até mesmo pelo cruzamento do sistema capacitivo sobre lombadas ou outras inclinações do pavimento, como pode ser visualizado no diagrama da figura a seguir (Figura 40).

Figura 40 - Diagrama com e sem recepção de sinal para o Ohmmapper.



Fonte: Autoria própria.

Assim, no caso da situação B da Figura 40, é visível que o transmissor do *Ohmmapper* e seu receptor não estão no mesmo plano para comunicação e emissão de dados em função da irregularidade da superfície do terreno, motivo que impede a captação do sinal enviado de audiofrequência de 16,5 kHz (frente de onda).

Desta forma, a partir de testes de campo pela variação da inclinação do dipolo transmissor, foi verificado que o ângulo limite para a recepção do sinal é de aproximadamente 8,0 graus, visto que acima deste ângulo de inclinação há interrupção na captação do sinal elétrico emitido e a perda de comunicação aérea entre os dipolos.

Esta necessidade de acoplamento num único plano entre o sistema transmissor e receptor da Resistividade Capacitiva para realização de medidas é bem similar ao comportamento característico do método Eletromagnético no Domínio da Frequência (*FDEM*), apontado em artigo técnico elaborado por McNeill (1980).

Um segundo motivo de impossibilidade de execução de medidas de resistividade elétrica constatado nos testes efetuados decorre da proximidade dos dipolos transmissor e receptor com objetos condutores elétricos e não massivos, possuidores de estrutura na forma de malhas, tais como grelhas, telas, cercas ou contenções metálicas, que são bem comuns nos ambientes urbanos e industriais.

Desta maneira, como constatado em alguns perfis de aquisição de dados com o *Ohmmapper*, o campo eletromagnético gerado pelo transmissor não consegue produzir corrente elétrica para subsuperfície em função da proximidade e indução de cargas nesses corpos condutores externos, sem medida de potencial elétrico no receptor do equipamento. Este efeito é similar à Gaiola de Faraday e que é uma blindagem elétrica onde uma superfície condutora pode, em certas situações, impedir a transmissão de campos elétricos e/ou eletromagnéticos (CHAPMAN *et al.* 2015).

Neste caso, o princípio fundamental do método de Resistividade Capacitiva de emissão de corrente elétrica para subsuperfície de forma capacitiva e geração de cargas no terreno por indução não é estabelecido e uma das formas de correção é aproximar os dipolos transmissor e receptor para que tenham comunicação e permitam a continuidade imediata nas medidas do perfil.

Porém, mesmo com este procedimento não houve o retorno do sinal algumas vezes nos ensaios de campo e foi necessário o reinício da linha e o desvio do objeto ou estrutura que era a fonte de interrupção da comunicação numa distância mínima de pelo menos 3,0 m durante a realização do novo perfil.

4.3. Terceiro ensaio: número de perfis e representatividade das feições

A realização deste terceiro ensaio teve por objetivo principal a aferição da representatividade das feições de subsuperfície tão somente em relação à menor ou maior quantidade de perfis executados para um mesmo alinhamento (Figura 41). Isto corresponde à comparação de diferentes amostragens, e sua influência na definição dos contornos das estruturas geológicas, desconsiderado o efeito do fator de proporcionalidade *n* e da menor unidade de interpolação dos dados e que serão discutidos no item posterior.

Figura 41 - Linha teste para avaliação da representatividade das feições.



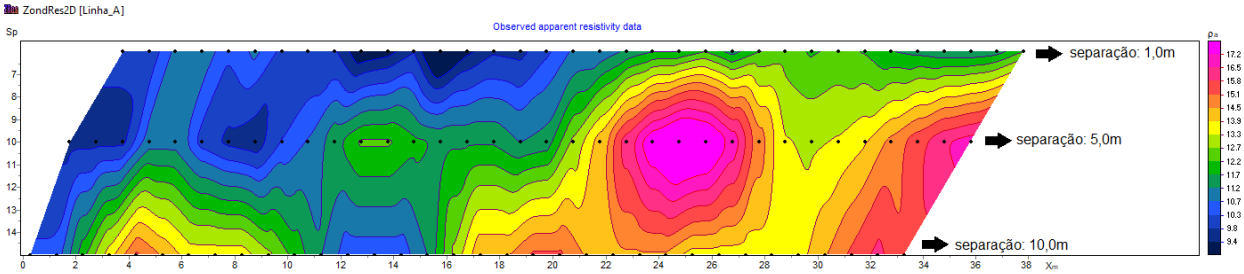
Fonte: Adaptado de Google Earth, 2022.

O maior comprimento de corda adotado neste teste foi de 12,0 metros, menor que o limite estabelecido de 14,4 metros e que foi definido no primeiro ensaio desenvolvido no local (seção 4.1.) quando considerada a perda de sinal elétrico na definição do parâmetro *skin depth*.

Para aferição dos resultados obtidos pelas diferentes configurações deste teste, foi necessária a avaliação das pseudo-seções originais de resistividade elétricas medidas em campo e não, portanto, as seções finais submetidas à tratamento de dados e elaboradas por processos iterativos de inversão para modelamento. Deste modo, por meio do programa ZondRes2D, versão 5.2 (KAMINSKIY, 2010), foram confeccionadas pseudo-seções de dados medidos de campo (Figuras 42 a 46), para os seguintes conjuntos de cordas de separação do transmissor e receptor:

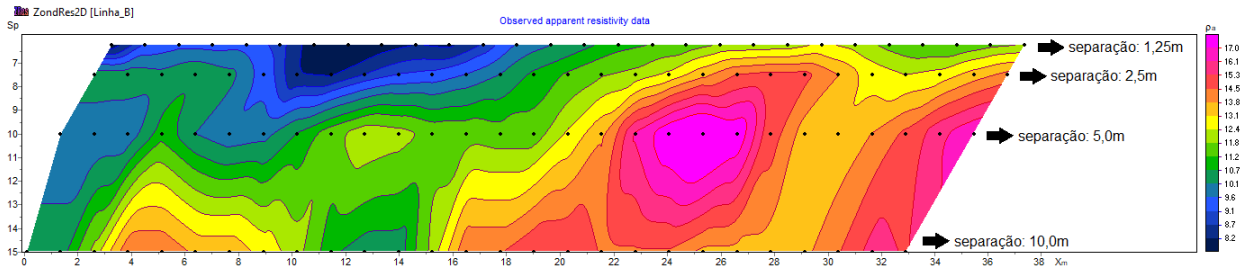
- Três separações: 1,0; 5,0 e 10,0 metros;
- Quatro separações: 1,25; 2,5; 5,0 e 10,0m e 2,5; 5,0; 10,0 e 12,0 metros;
- Cinco separações: 1,25; 3,75; 7,0, 10,0 e 12,0 metros;
- Oito separações: 1,0; 1,25; 2,5; 3,75; 5,0; 7,0; 10,0 e 12,0 metros.

Figura 42 - Pseudo-seção de separações de 1,0; 5,0 e 10,0 m.



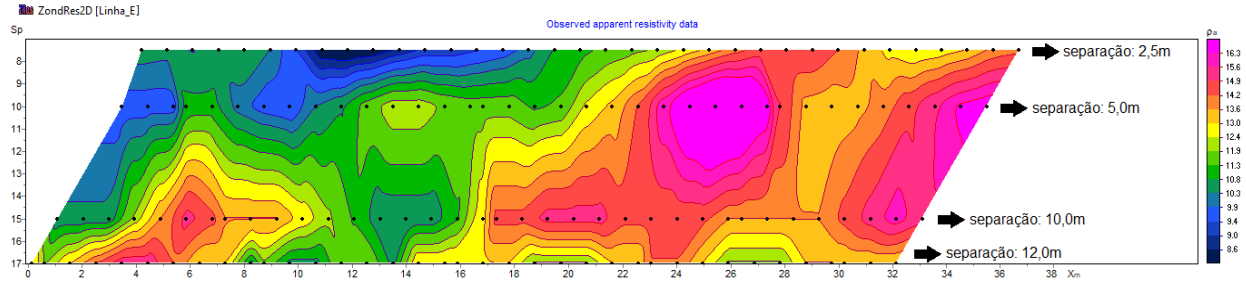
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 43 - Pseudo-seção de separações de 1,25; 2,5; 5,0 e 10,0 m.



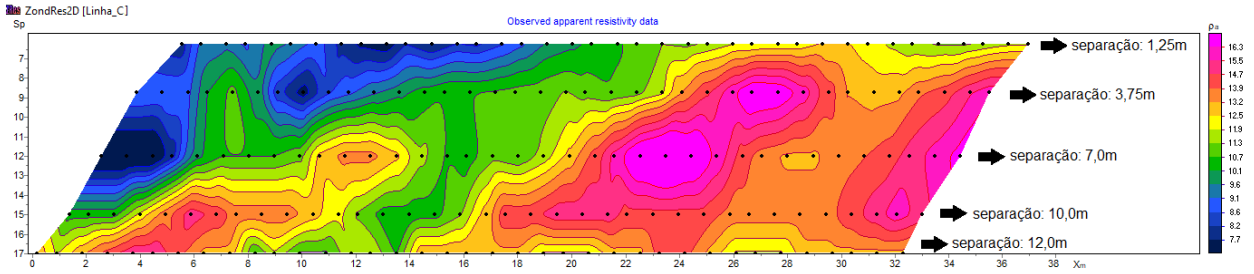
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 44 - Pseudo-seção de separações de 2,5; 5,0; 10,0 e 12,0m.



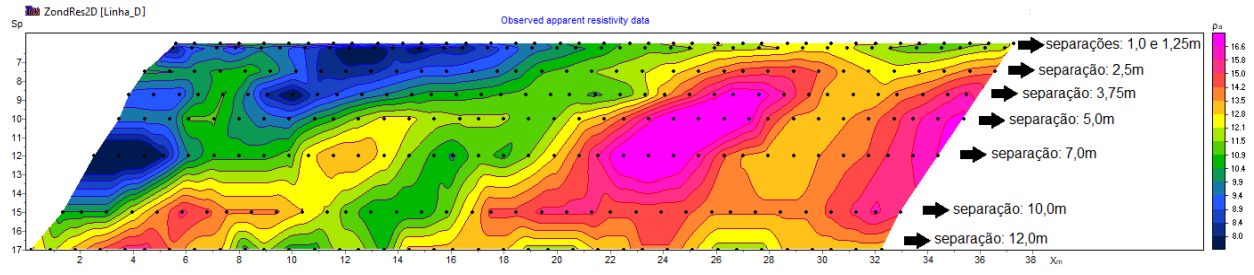
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 45 - Pseudo-seção de separações de 1,25; 3,75; 7,0, 10,0 e 12,0 m.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 46 - Pseudo-seção de todas as oito separações utilizadas.



Fonte: Dados da pesquisa.

De maneira geral, todas as imagens anteriores apresentam, de forma mais genérica, uma zona de menor resistividade elétrica do início até o meio da pseudo-seção e uma região de maior resistividade em sua metade final e que podem corresponder aos efeitos de heterogeneidades geológicas como as visualizadas no corte de estrada da Figura 35.

Os resultados indicam que a quantidade de separações é proporcional a quantidade de perfis amostrados com maior detalhe e definição dos contornos das eventuais feições geológicas presentes, ou seja, uma relação direta entre densidade amostral e resolução.

A princípio, a aquisição de dados ideal seria a amostragem de maior número possível de pontos de medidas e com grande detalhamento, como apresentado na pseudo-seção de resistividade elétrica da Figura 46, com dados obtidos com todas as separações de cordas (1,0; 1,25; 2,5; 3,75; 5,0; 7,0; 10,0 e 12,0 m).

Entretanto, nos trabalhos práticos de campo, muitas vezes existe a restrição de tempo de aquisição de dados, principalmente quando a área for muito extensa e demandar grande quantidade de linhas de levantamento, o que dificultaria a aquisição de muitos perfis por linha.

Um resultado importante é verificado ao comparar a pseudo-seção da Figura 45, com cinco perfis de separações, com a imagem da Figura 46 com dados de oito perfis e que, praticamente, apresentam os mesmos contornos geológicos, o que implica que o maior número de perfis não necessariamente pode representar um ganho maior de detalhamento das feições, onde é mais importante a regularidade nos níveis de amostragem, como é o caso da Figura 45.

Esta mesma conclusão também pode ser considerada na análise comparativa entre as pseudo-seções das Figuras 42 e 43, que são relativamente semelhantes, com a primeira com três níveis de amostragem mais regulares e a segunda com quatro níveis, porém não regulares, indicativo que a adoção de um perfil adicional nem sempre significa um incremento de representatividade das feições.

Assim, caso o objetivo seja definir as conformações de corpos geológicos em maiores detalhes (maior resolução) seria necessário um levantamento com mais dados e, portanto, maior quantidade de perfis.

Por outro lado, caso o trabalho requeira a avaliação de feições de maiores dimensões, como por exemplo o mapeamento de pluma de contaminação numa grande área, onde é mais importante a determinação de limites ou contatos mais amplos (menor resolução), a menor quantidade de perfis de amostragem pode ser

utilizada de forma satisfatória, como por exemplo apenas três perfis com separações distintas de transmissor e receptor.

4.4. Quarto ensaio: separações dos dipolos e resolução dos dados

Este ensaio controlado foi executado no mesmo local dos anteriores e se refere à execução de perfis para aferição da influência da separação dos conjuntos dipolos transmissor e receptor na resolução dos dados obtidos, o que corresponde ao estudo de diferentes comprimentos das cordas utilizadas e do fator de proporcionalidade *n* afetando o detalhamento das estruturas presentes em subsuperfície (Figura 47).

Figura 47 - Linha teste de separações dos dipolos e linha GPR.



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2022.

Desta maneira, deve ser destacado que este ensaio teve por objetivo correlacionar o número de separações utilizadas, a menor unidade de interpolação de dados médios (*smallest unit electrode spacing)* determinada pelo programa de inversão e o detalhamento dos contornos (resolução) das feições observadas em profundidade.

Portanto, para avaliação dos efeitos na resolução do sinal causadas pelas alterações dos parâmetros de levantamento, foi necessário tomar como referência um alvo conhecido de menor dimensão, que neste caso é representado por tubulação de água e esgoto, cuja constituição é de PVC (policloreto de vinila), e que está posicionada numa profundidade de 1,75 m, obtida por medida direta no local, e que possuiu um diâmetro de 0,15 m, cujo trajeto foi interceptado pelos perfis do ensaio de maneira transversal (Figura 48).

Figura 48 - Execução de perfil e cruzamento com tubulação conhecida.



Fonte: O autor.

Na execução dos perfis de Resistividade Capacitiva deste ensaio, foram utilizadas, inicialmente, três conjugações distintas de distâncias entre as extremidades dos dipolos transmissor e receptor e que são determinados pelos comprimentos das cordas de separação (*S*), lembrando aqui que cada dipolo individual possui uma extensão de 5,0 metros.

O primeiro conjunto aplicado de separações entre o transmissor e o receptor se refere aos comprimentos das cordas de 1,0; 3,75; 5,0 e 10,0 m, sendo que para o segundo conjunto são adotados três comprimentos apenas, que são de 1,0; 5,0; 10,0 m, e para o terceiro grupo as distâncias são 1,25; 3,75, 5,0 e 10,0 m.

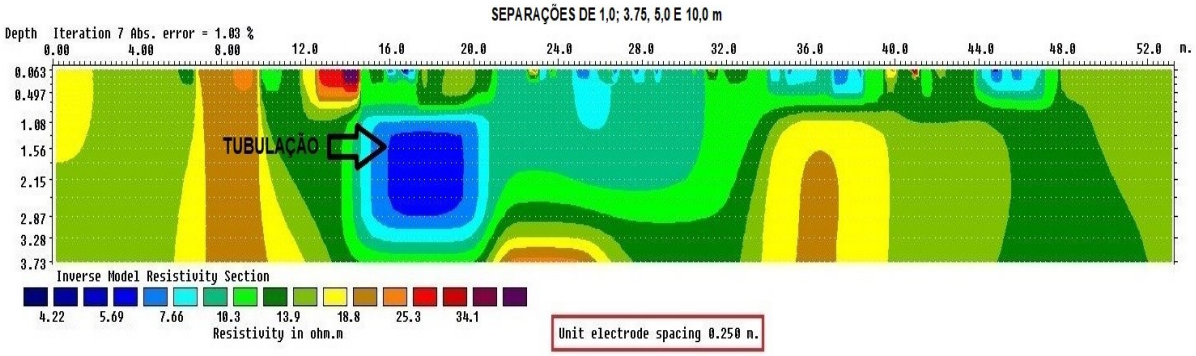
É importante registrar que, na utilização das separações de cordas de 1,0, 1,25; 3,75, 5,0 e 10,0 m com o emprego de dipolos de 5,0 m de extensão (*L*), as distâncias entre os centros do dipolo transmissor e do dipolo receptor (*X*) são, respectivamente, 6,0, 6,25, 8,75, 10,0 e 15,0 m.

Além disso, deve ser reportado que a taxa de amostragem deste levantamento em tempo foi de uma emissão de sinal por segundo (1,0 Hz) num intervalo de medida a cada 0,89 m, com uma velocidade média de aquisição de 3,2 km/h.

Na etapa de processamento deste ensaio, os dados obtidos em campo foram preservados de forma mais original possível, pois nem sempre é recomendável suas filtragens prévias pelo programa de aquisição Magmap2000 e que, além de removerem “ruídos do sinal”, podem eliminar anomalias geofísicas de interesse. Para casos de detecção de objetos artificiais em subsuperfície, muitas vezes, são as feições fora do padrão (anômalas) que são aquelas procuradas.

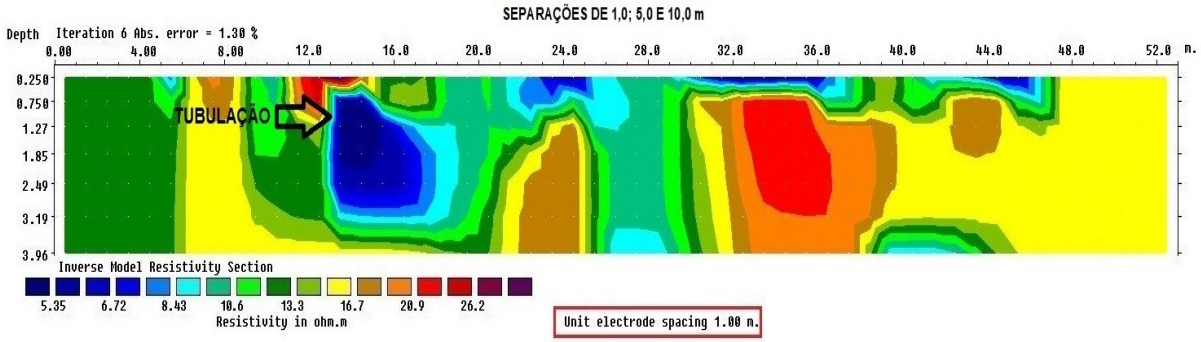
Para a geração das seções aqui analisadas dos diferentes conjuntos de distâncias, foi empregado o programa de inversão Res2Dinv (LOKE, 2004), onde a imagem resultante apresentada na Figura 49 corresponde à primeira combinação de separações (1,0; 3,75; 5,0 e 10,0 m), a Figura 50 é referente à seção obtida pela segunda combinação (1,0; 5,0; 10,0 m), e, por fim, a Figura 51 representa a seção do terceiro grupo (1,25; 5,0 e 10,0 m).

Figura 49 - Seção para separações de cordas de 1,0; 3.75, 5,0 e 10,0 m.



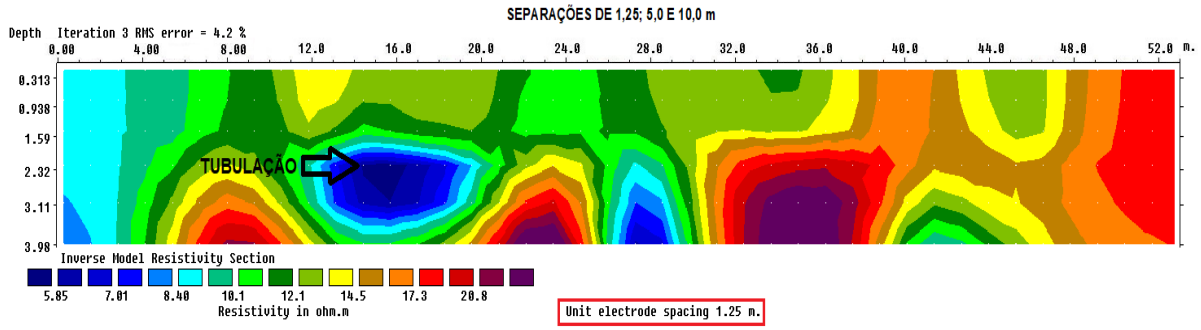
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 50 - Seção para separações de cordas de 1,0; 5,0 e 10,0 m.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 51 - Seção para separações de cordas de 1,25; 5,0 e 10,0 m.



Fonte: Dados da pesquisa.

De modo geral, em todas as seções com conjuntos distintos de separações dos dipolos é possível reconhecer uma anomalia de baixa resistividade elétrica relacionada ao duto existente.

Neste caso, os baixos valores de resistividade ou alta condutividade elétrica correspondem, em realidade, a presença da água e esgoto contidos no interior do duto de PVC, uma vez que este material plástico possui elevada resistividade, da ordem de 1,5 x 10^{11} ohm.m (FERREIRA, 2009).

Este comportamento da Resistividade Capacitiva ao evidenciar a baixa resistividade elétrica do conteúdo interno dos invólucros confirma alguns dos resultados obtidos por Cavenaghi (2017) e que apontam a predominância de fenômenos eletromagnéticos de indução detectados pelo método capacitivo neste tipo de situação.

A seção da Figura 49 revela que o programa de inversão estabeleceu o valor reduzido de 0,25 m de espaçamento como a menor unidade de interpolação para as separações de 1,0; 3,75; 5,0 e 10,0 m, isto porque estas não são distâncias múltiplas, nem regulares, e que neste caso forma a seguinte sequência não binária do fator *n*: 0,2; 0,75; 1,0 e 2,0.

Assim, ao fixar 0,25 m como menor unidade para cálculo de médias, o programa matematicamente emulou dados não medidos dentro do intervalo real de amostragem, o qual é de 0,89 m como indicado anteriormente, condição que indica a inadequabilidade da seleção do conjunto de separações de 1,0; 3,75; 5,0 e 10,0 m.

A única forma, portanto, de contornos mais detalhados das feições para este conjunto de cordas seria a aquisição numa taxa de amostragem de 0,25 m por medida, o que teria que ser programado previamente, mas que implicaria numa menor velocidade de execução do perfil e redução do tempo de disparo do sinal, que é de no máximo de duas medidas por segundo (2,0 Hz).

Para o segundo conjunto de três distâncias de 1,0; 5,0; 10,0 m, que é uma sequência de números múltiplos inteiros, o programa estabeleceu 1,0 m como menor unidade de interpolação de dados médios, como pode ser observado na seção da

Figura 50, mesmo que esta sequência do fator *n* não seja binária, dada por 0,2; 1,0 e 2,0.

Neste caso, o valor da unidade de interpolação de 1,0 m para este conjunto de separações é próximo do espaçamento de amostragem média do perfil de 0,89 m, isto é, para cada 1,0 m de busca de dados para cálculo de média, haverá pelo menos um dado medido a cada 0,89 m, ao que torna os dados interpolados mais próximos do que realmente foi amostrado.

Por fim, a Figura 51 apresenta o resultado das medições com as separações de 1,25; 5,0 e 10,0 m, correspondente a uma sequência de fração binária do fator *n* (0,25; 1,0 e 2,0), onde a menor unidade de interpolação determinada é 1,25, maior até que as anteriores, mas que proporciona feições realistas na imagem gerada, com variações de resistividades elétricas menos abruptas que as demais seções e com a configuração representativa da tubulação existente, mais simétrica e mais próxima da profundidade real do duto.

Como exemplo de falseamento de contorno, deve ser observado que, na Figura 49, a anomalia de baixa resistividade elétrica que representa a tubulação subterrânea conhecida aparece com forma retangular e está posicionada na distância aproximada de 17,5 m e profundidade de topo de cerca de 1,30 m, e que, do contrário, aparece com contornos mais arredondados nas imagens das Figuras 50 e 51, o que é mais condizente com a seção circular do duto existente.

Uma análise comparativa das feições presentes nessas seções permite afirmar que a imagem da Figura 49, mesmo com maior número de separações de dipolo (quatro), apresenta configurações gerais bem mais suavizadas que as apresentadas na seção da Figura 50 e da Figura 51, ambas de três separações apenas e com esta última obedecendo a sequência de fração binária.

Além disso, os erros estatísticos médios dos processos de iterações entre os dados medidos e os calculados (*RMS*) para geração das seções modeladas e indicados nas Figuras 49, 50 e 51 pelos valores 1,03%, 1,30% e 4,2%, respectivamente, também apontam que não necessariamente o menor valor obtido será da seção com representatividade mais detalhada das feições.

Outra diferença marcante neste ensaio corresponde ao posicionamento do duto conhecido, que, na Figura 51, está na distância horizontal de 16,0 m de forma mais realista, distinta das determinadas nas seções das Figuras 49 e 50, respectivamente, em 17,5 e 14,5 m, o que certamente é provocado pelas diferentes sequências de fatores *n* de cada conjunto de cordas utilizado e, consequentemente, pelas diferentes unidades de interpolação de dados.

Assim, é possível verificar que a separação entre os dipolos tem relação intrínseca de melhor resolução com a profundidade e posicionamento do alvo. Neste caso, o comprimento de corda de 1,25 m apresentou melhores resultados para a estrutura localizada a 1,75 m de profundidade, como visto nas seções anteriores.

Uma análise detalhada das porções próximas da superfície nas imagens anteriores, permite reconhecer anomalias espúrias de altas e baixas resistividades elétricas e de dimensão reduzida até 1,0 m de profundidade nas seções das Figuras 49 e 50, cujas menores unidades de interpolação são de 0,25 e 1,0 m respectivamente. Este fato não ocorre com a seção da Figura 51, com unidade de interpolação de 1,25 m, indicativo da relevância deste parâmetro na qualidade do resultado obtido e da importância de adoção de uma sequência de fração binária do fator *n*.

Diante dos aspectos aqui discutidos, é possível concluir por esses resultados que caso o objetivo seja o delineamento dos contornos das feições com melhor definição e mais realista, o conjunto de separações mais adequado é o terceiro, com três comprimentos de cordas, de 1,25; 5,0; 10,0 m. Merece destaque que a corda de 1,25 m de extensão (*S*) possui uma relação com a profundidade real (*D*) do duto de 1,75 m numa razão de 1:0,71 e com melhor amostragem deste alvo que a de cordas mais curtas de 1,0 m dos outros dois arranjos, cuja relação é de 1:0,57.

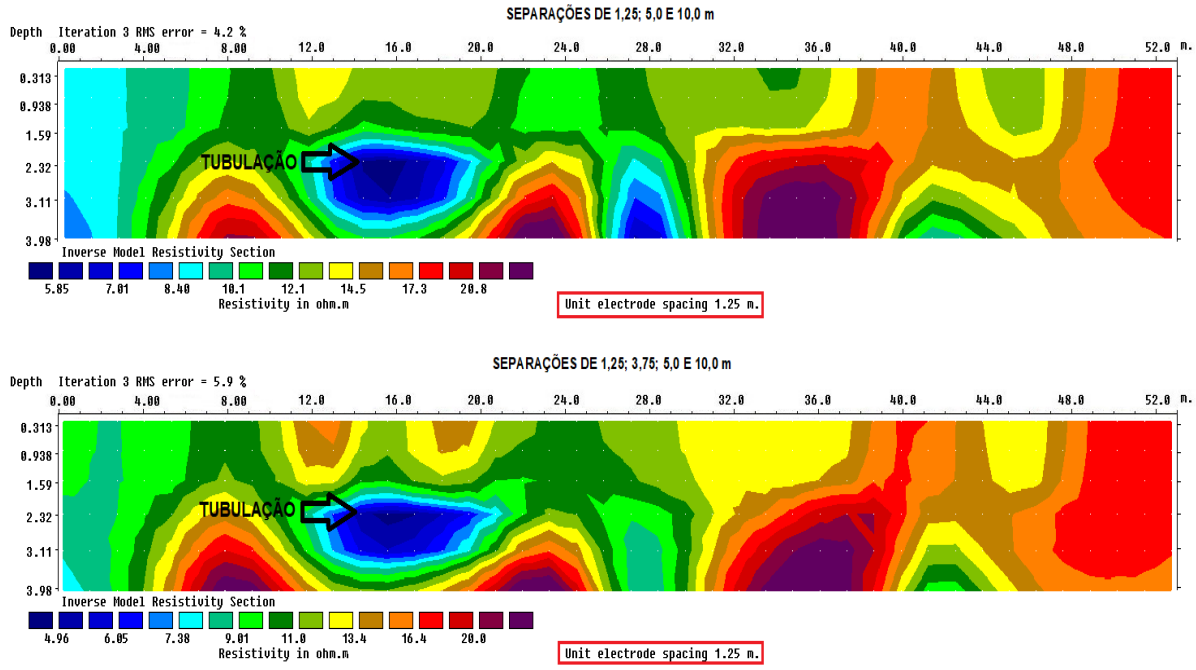
Portanto, a relação ideal *S/D* para melhor representar as feições de um determinado alvo seria a mais próxima de 1:1, embora restrita pela condição da distância da corda enquadrada numa sequência binária, o parâmetro mais importante para um melhor detalhamento de subsuperfície, como visto até aqui.

Em referência à relação S/D ideal mais próxima de 1:1 e considerado o limite mais curto da corda de separação de 1,25 m, é possível inferir que dutos mais rasos que

1,0 m de profundidade não serão passiveis de detecção de forma precisa pelo método capacitivo, ou seja, somente em amostragens de níveis mais profundos.

Para corroborar como assertiva que a sequência binária do fator *n* é o elemento mais importante para detalhar as configurações das estruturas de subsuperfície no método de Resistividade Capacitiva, foi elaborada uma seção com quatro comprimentos de cordas de 1,25; 3,75; 5,0 e 10,0 m numa sequência binária de 0,25; 0,75; 1,0 e 2,0 e que foi comparada ao resultado da Figura 51 com três separações de 1,25; 5,0 e 10,0 m, também de sequência binária (0,25; 1,0 e 2,0) e que havia apresentado anteriormente os melhores resultados de detalhamento das feições.

Figura 52 - Seções de sequência binária de diferentes separações de cordas.



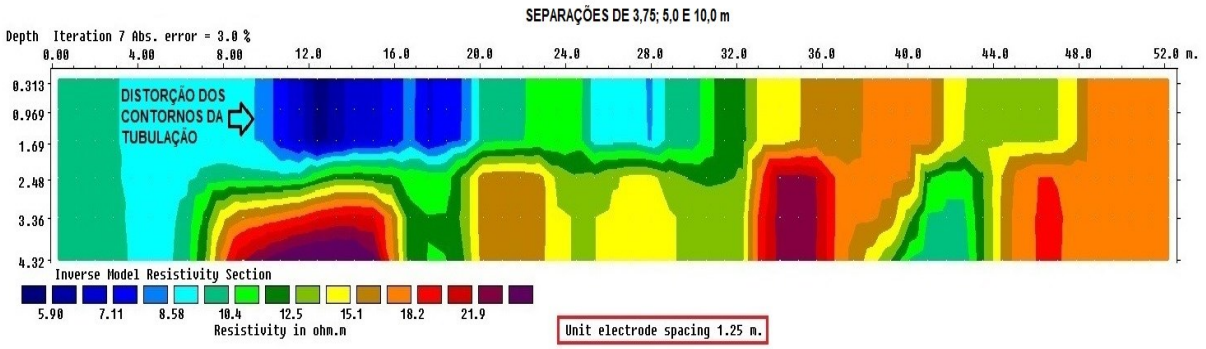
Fonte: Dados da pesquisa.

A análise comparativa entre essas seções (Figura 52) revela que os contornos obtidos das estruturas em profundidade são mantidos praticamente os mesmos, bem como as variações de resistividade elétricas também são muito próximas nessas duas seções, sem ganho efetivo nos resultados finais deste ensaio com o acréscimo de mais uma distância de separação das cordas, que neste caso específico foi de 3,75m.

A fase final do teste consistiu numa última seção de resistividade elétrica com as cordas numa sequência binária de comprimento de 3,75; 5,0 e 10,0 m para

investigação da tubulação existente e de como seria sua representatividade num conjunto não adequado de separações em relação à profundidade conhecida do alvo, o que pode ser visualizado na Figura 53 a seguir.

Figura 53 - Seção de separações de cordas de 3,75; 5,0 e 10,0 m.



Fonte: Dados da pesquisa.

A seção da Figura 53, mesmo com uma unidade de interpolação de valores médios condizente (1,25 m) e erro quadrático médio (*RMS*) baixo (3,0%), apresenta uma baixíssima resolução, com distorção de contornos das feições de estruturas mais rasas e com detalhamento insuficiente para a determinação com precisão do posicionamento da tubulação conhecida.

Esta situação decorre do comprimento da corda mais curta deste arranjo, que é de 3,75 m, exceder em mais de duas vezes a profundidade de 1,75 m do duto conhecido (relação *S/D* de 1:2,14), que apesar de possibilitar melhor detalhamento em profundidades maiores de investigação, não fornece a resolução e definição adequadas para as feições localizadas em níveis mais superficiais.

Assim, as estruturas geológicas ou artificiais não necessariamente são melhor definidas neste ensaio conforme os aspectos descritos, mesmo com maior número de separações dos dipolos (diferentes cordas) e, consequentemente, mais perfis realizados para uma determinada linha de levantamento.

A seguir, é apresentada a Tabela 3 e que contém os principais parâmetros comparativos das diferentes configurações e os resultados obtidos neste teste realizado. Neste caso, a relação S/D consiste no comprimento da menor separação dividido pela profundidade do alvo, idealmente igual a 1:1.

Tabela 3 - Parâmetros comparativos dos diferentes conjuntos de cordas.

Comprimentos das cordas (m)	Número de cordas	Sequência binária do fator *n*	Sequência de múltiplos inteiros	Relação S/D	Erro estatístico *(RMS)*	Resolução para alvo raso
1,0; 3,75; 5,0 e 10,0	04	Não	Não	1:0,57	1,03%	baixa
1,0; 5,0; 10,0	03	Não	Sim	1:0,57	1,30%	média
1,25; 5,0 e 10,0	03	Sim	Não	1:0,71	4,2%	alta
1,25; 3,75; 5,0 e 10,0	04	Sim	Não	1:0,71	5,9%	alta
3,75; 5,0 e 10,0	03	Sim	Não	1:2,14	3,0%	baixíssima

Fonte: Dados da pesquisa.

Portanto, os resultados obtidos neste ensaio controlado indicam que é possível a detecção de duto subterrâneo por meio da técnica de imageamento de resistividade capacitiva, desde que obedecido os critérios discutidos em relação à separação entre transmissor e receptor e da menor unidade interpolação de médias, que estão associados ao fator de proporcionalidade *n*.

Deste modo, também seria possível supor que para detectar com precisão objetos muito rasos com o equipamento *Ohmmapper*, por exemplo na profundidade de até 0,50 m (*D*), devem ser adotadas separações de corda (*S*) com comprimentos bem curtos e mantida a razão *S/D* ideal de 1:1.

Porém, considerada a adoção de uma sequência binária de fatores *n*, a aplicação dessas separações curtas não seria possível uma vez que, para um dipolo de 5,0 m de extensão, o menor comprimento de corda seria a de 1,25 m, como indicado anteriormente na Tabela 2, o que resultaria numa relação não adequada de *S/D* igual a 2,5.

Assim, mantida a relação S/D mais próxima de 1:1 para a corda mais curta de 1,25 m da sequência binária, é possível prever que o método de Resistividade Capacitiva somente apresentará uma melhor resolução para alvos a partir de 1,0 m de profundidade.

Quanto à importância dos parâmetros de levantamento, a adoção de um intervalo de medidas adequado para realização do perfil de campo, associado à taxa de disparo do sinal em tempo e à velocidade de execução da linha são as mais relevantes por estarem relacionados à dimensão do alvo a ser detectado. E, conforme

já descrito, a taxa de amostragem deste ensaio em tempo foi de uma emissão de sinal por segundo (1,0 Hz), com intervalo de medidas a cada 0,89 m e velocidade média de aquisição de 3,2 km/h, condizentes ao objetivo proposto de identificação da tubulação subterrânea em questão.

Neste mesmo local (Figura 47), também foi executado um perfil com o método de *GPR*, cujos dados foram adquiridos com o equipamento multifrequencial modelo localizador *Easy Locator Pro Widerange HDR* (Figura 54), fabricado pela empresa Malä Geoscience da Suécia, com intuito de comparar os resultados e a resolução obtida entre este método e a Resistividade Capacitiva.

Os parâmetros de aquisição deste levantamento *GPR* foram baseados em perfilagem contínua, com aquisição de sinais a cada 1,7 cm, com 1014 amostras, janela de tempo de 198 ns e arranjo dipolo (ou common offset), que corresponde a uma separação de 0,17 metros entre as antenas transmissora e receptora do canal de maiores frequências do equipamento.

Figura 54 - Foto do equipamento GPR Easy Locator Pro Widerange HDR.



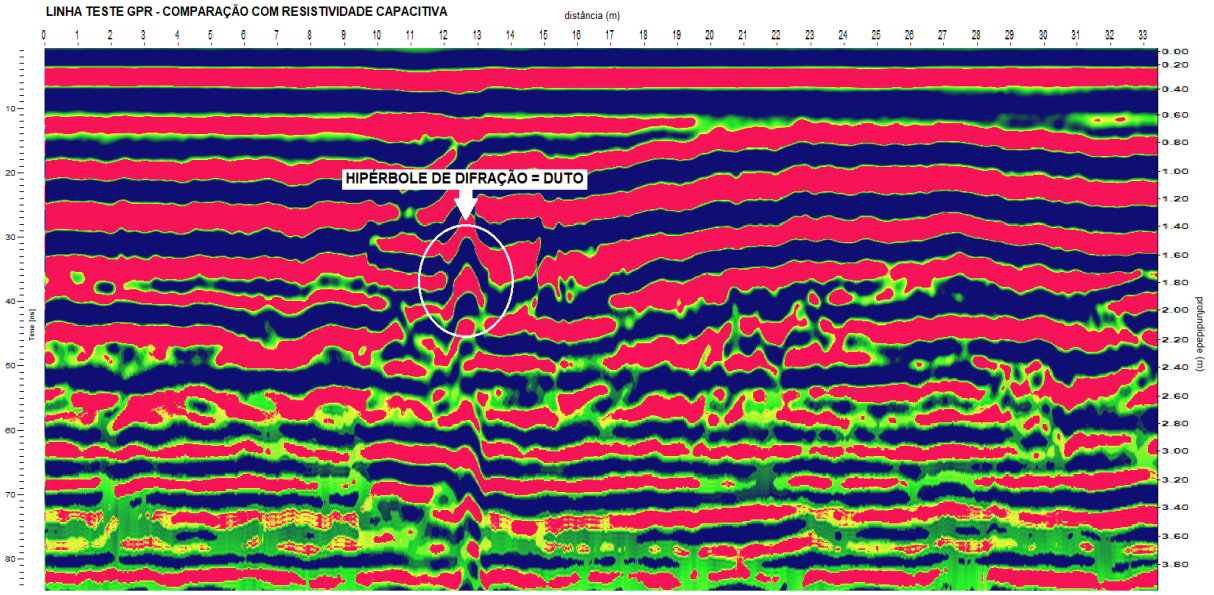
Fonte: O autor.

Assim, o resultado da linha *GPR* executada neste ensaio é apresentado na seção da Figura 55, a qual foi obtida através do processamento de dados pelo

programa Radexplorer, versão 1.4, da Deco Geophysical Ltd (2005), e que também gerou as demais seções deste método a serem apresentadas posteriormente.

Desta maneira, a Figura 55 indica o posicionamento do duto de interesse na distância de 12,5 m e profundidade aproximada de 1,70 m, representado pelo sinal de hipérbole de difração, que, segundo Botelho & Araújo (2003), são configurações geométricas que aparecem na imagem resultante quando corpos de extensão lateral limitada são seccionados transversalmente pelo perfil executado.

Figura 55 - Seção de GPR com duto identificado (hipérbole de difração).



Fonte: Dados da pesquisa.

Mesmo com base nos critérios anteriormente discutidos e que apontam a capacidade que o método de Resistividade Capacitiva em localizar dutos subterrâneos (Figuras 49, 50 e 51), seus resultados, na forma de medidas interpoladas de resistividade elétrica, não serão tão eficientes para este objetivo específico em profundidades rasas como os apresentados pelo método geofísico de *GPR*, conforme observado na Figura 55.

É visível que o resultado do *GPR* apresenta maior precisão para a determinação de posicionamento do duto em função da melhor resolução (detalhamento) e discretização dos dados obtidos, além da possibilidade de identificação *in loco* do alvo, sem a necessidade de pós-processamento de dados.

Entretanto, é possível supor que abaixo de determinada profundidade onde o sinal dos equipamentos *GPR* modelos localizadores (ou detectores), de média e alta frequência de operação começam a perder penetração, principalmente em terrenos argilosos com baixa resistividade elétrica (DAVIS & ANNAN, 1989), a aplicação da Resistividade Capacitiva poderá ser uma alternativa para detecção de eventuais dutos subterrâneos em níveis mais profundos, caso sejam adotados os parâmetros adequados de aquisição de dados.

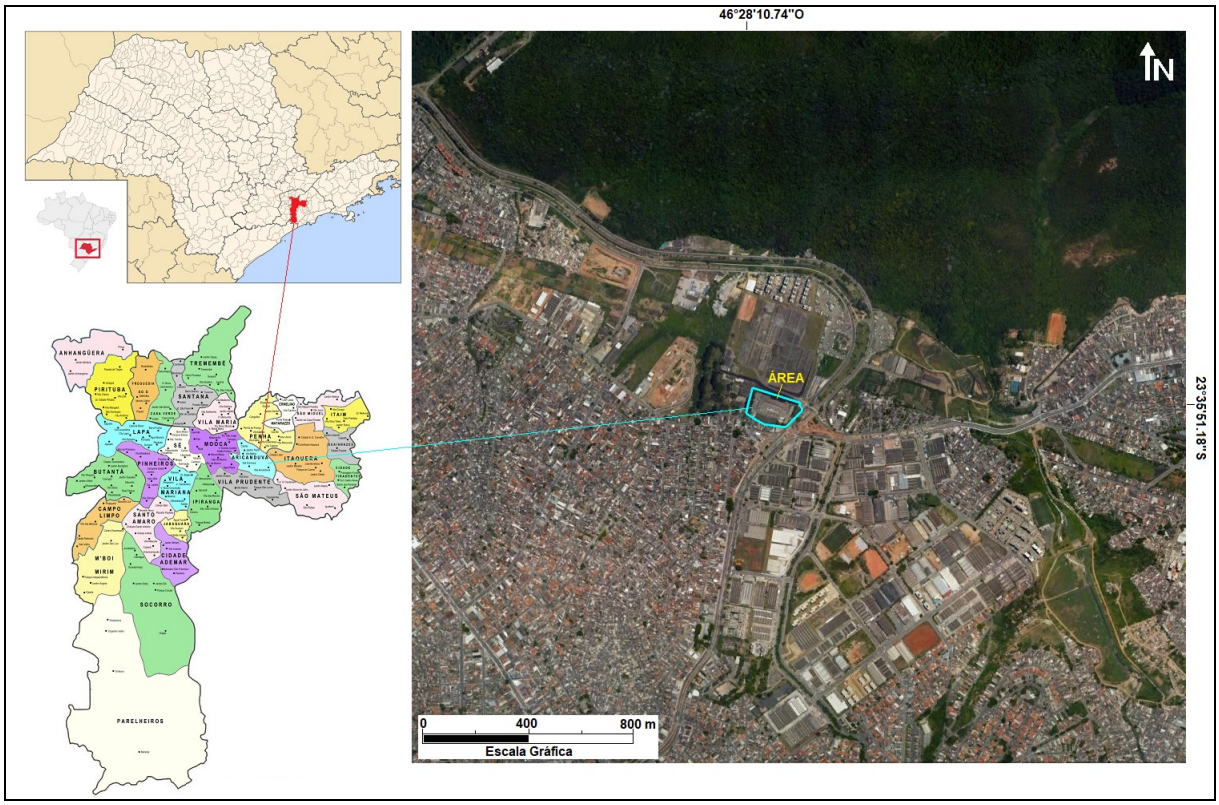
Adicionalmente, deve ser destacado que o revestimento asfáltico não apresentou dificuldades à emissão e recepção dos sinais elétricos pelo equipamento *Ohmmapper* ou influenciou os resultados obtidos, como também não foram observados efeitos adversos à qualidade dos dados por proximidade com rede elétrica aérea.

4.5. Estudo de caso: contaminação subterrânea orgânica e inorgânica

Na sequência, é apresentado um estudo de caso onde o método de Resistividade Capacitiva foi aplicado no ano de 2019 para avaliação de área de transbordo de resíduos, localizada no município de São Paulo (Figura 56), e para aferição da capacidade de detecção dos pontos com maiores concentrações de compostos orgânicos associados ao vazamento de combustíveis ocorrido em 2010, bem como para identificação dos locais de eventual infiltração de chorume e com maior presença de contaminantes inorgânicos que não foram monitorados nos poços existentes.

Além da detecção da contaminação orgânica ainda remanescente após as atividades de bombeamento da água subterrânea para a remediação do local, o objetivo principal deste levantamento geofísico foi avaliar a potencialidade do método de Resistividade Capacitiva na distinção dos principais focos de contaminação orgânica e inorgânica, com intuito de segregá-los conforme os valores obtidos das anomalias de maiores ou menores resistividades elétricas, bem como analisar comparativamente esses resultados com dados de *GPR* também aplicado neste caso.

Figura 56 – Localização da área de transbordo de resíduos.



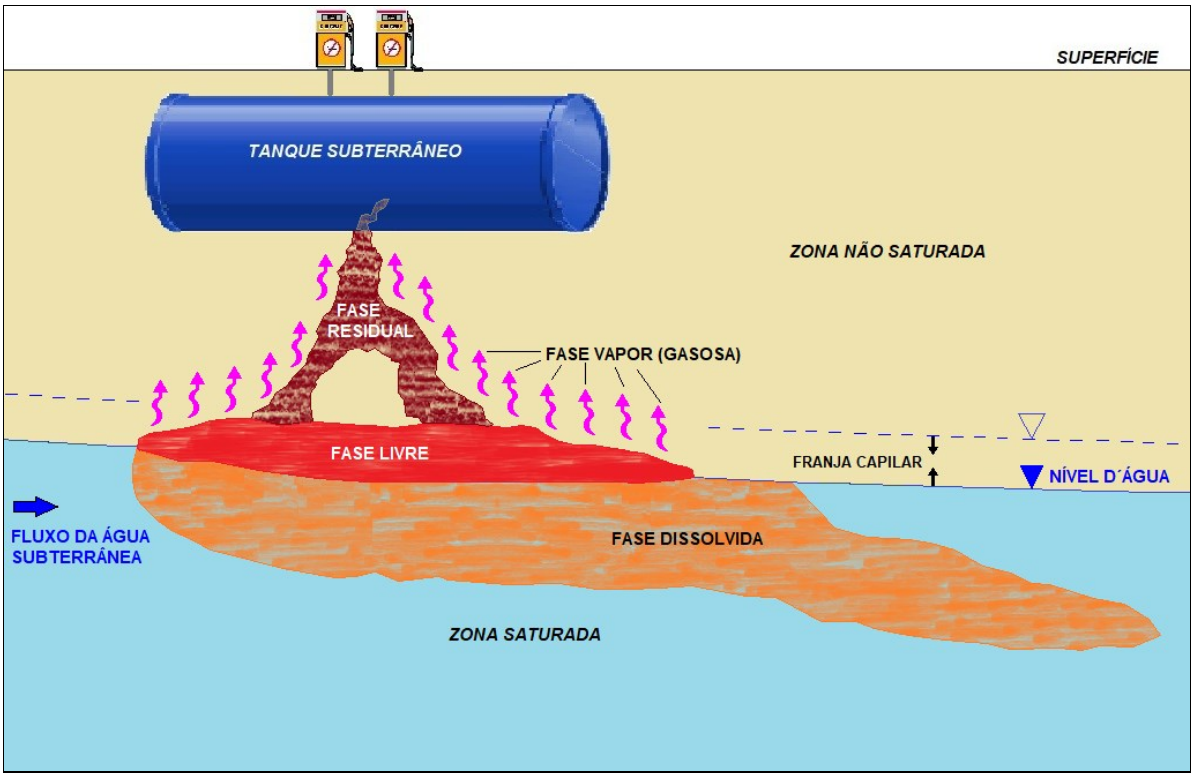
Fonte: Adaptado do Google Earth, 2022.

Como visto na Tabela 1, é necessário registrar que os combustíveis são compostos orgânicos de alta resistividade elétrica, que podem tornar o ambiente resistivo num curto intervalo de tempo e condutivo num período mais longo de permanência em subsuperfície (PELLERIN & GROOM, 2003). São imiscíveis e menos densos que a água subterrânea (*light non aqueous phase liquid – LNAPL*) e que, de acordo com Ferreira S.M. *et al*. (2004), constituem as seguintes fases quando presentes em eventos de contaminação subterrânea (Figura 57):

- Fase adsorvida: parte do combustível que fica adsorvida na matéria orgânica, tanto na zona saturada, como na zona não saturada;
- Fase residual: porção do hidrocarboneto que percola e fica retido nos poros sob forma de glóbulos desconectados;
- Fase gasosa ou fase vapor: parcela de compostos voláteis presentes na zona não saturada do terreno e é originada principalmente das fases livre e adsorvida;
- Fase livre: produto sobrenadante em estado puro na água subterrânea (altas concentrações), denominado também de fase líquida;

- Fase dissolvida: fração dissolvida na água subterrânea, cujas concentrações podem ser superiores aos limites de potabilidade, mas menores que as da fase livre.

Figura 57 – Fases de compostos orgânicos LNAPL em subsuperfície.



Fonte: Modificado de Ferreira S.M. *et al*., 2004.

Cabe destaque que os poços de bombeamento foram instalados na área em 2013 e 2018 para remoção de combustível e sua maioria perdeu eficiência e não extraía mais fase livre na ocasião dos levantamentos geofísicos, mas apenas água com fase dissolvida, o que demandou a atualização de diagnóstico para remanejamento dos pontos de retirada de produto.

Em relação à infiltração de chorume no solo, este contaminante é originado pela decomposição dos compostos orgânicos e inorgânicos dos resíduos domiciliares presentes na área estudada. Assim, esta contaminação é atribuída ao derramamento de líquidos dos resíduos nas atividades de transbordo a partir das caçambas de coleta urbana para as unidades de armazenamento provisório, constituídas por uma série de contêineres dispostos lado a lado, além da uma possível infiltração difusa causada pela movimentação dos caminhões de transporte pelo local (Figura 58).

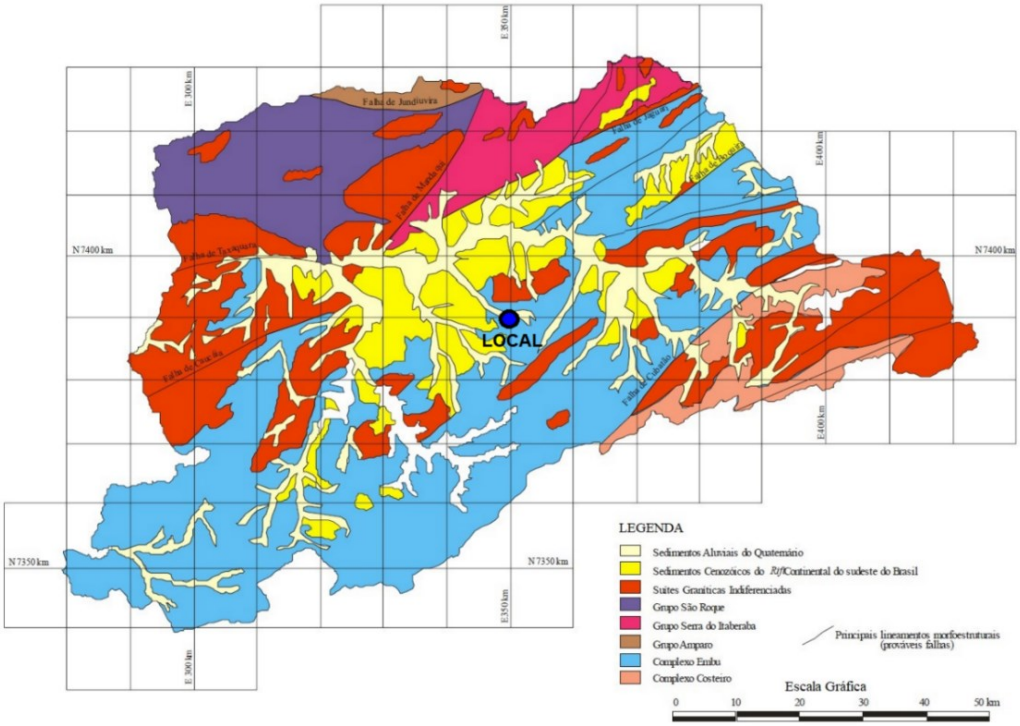
Figura 58 – Escoamento de chorume no piso local.



Fonte: O autor.

A área em questão está situada em região de várzea de rio na Região Metropolitana de São Paulo (Figura 59) e onde são realizadas atividades de manejo, transbordo e armazenamento temporário de resíduos domésticos antes de serem encaminhados à disposição final em aterros sanitários.

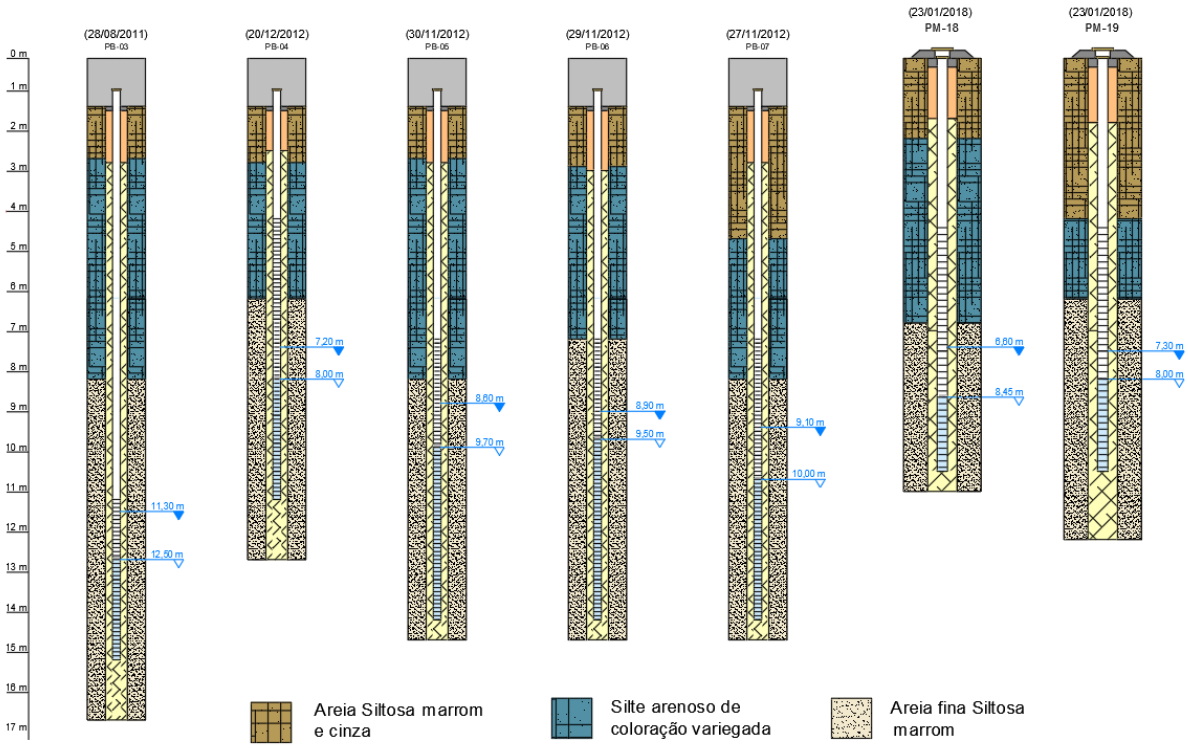
Figura 59 – Localização da área de estudo no mapa geológico da RMSP.



Fonte: Adaptado de Gurgueira, 2013.

O contexto geológico local é constituído de solos aluviais, com materiais siltosos mais rasos e, predominantemente, arenosos pouco mais profundos conforme as descrições de sondagens realizadas na área para instalação de poços de monitoramento e bombeamento (Figura 60).

Figura 60 – Perfis de sondagens executadas na área de transbordo.



Fonte: Compilado pelo autor.

As porções internas e externas do local investigado apresentam grande variação do nível d´água, com sentido de fluxo subterrâneo para norte de acordo às medições efetuadas nos poços de monitoramento instalados no local, que estão compiladas na Tabela 4, além de medições de espessura de fase livre.

Tabela 4 - Medidas dos poços e concentração de benzeno (março/2018).

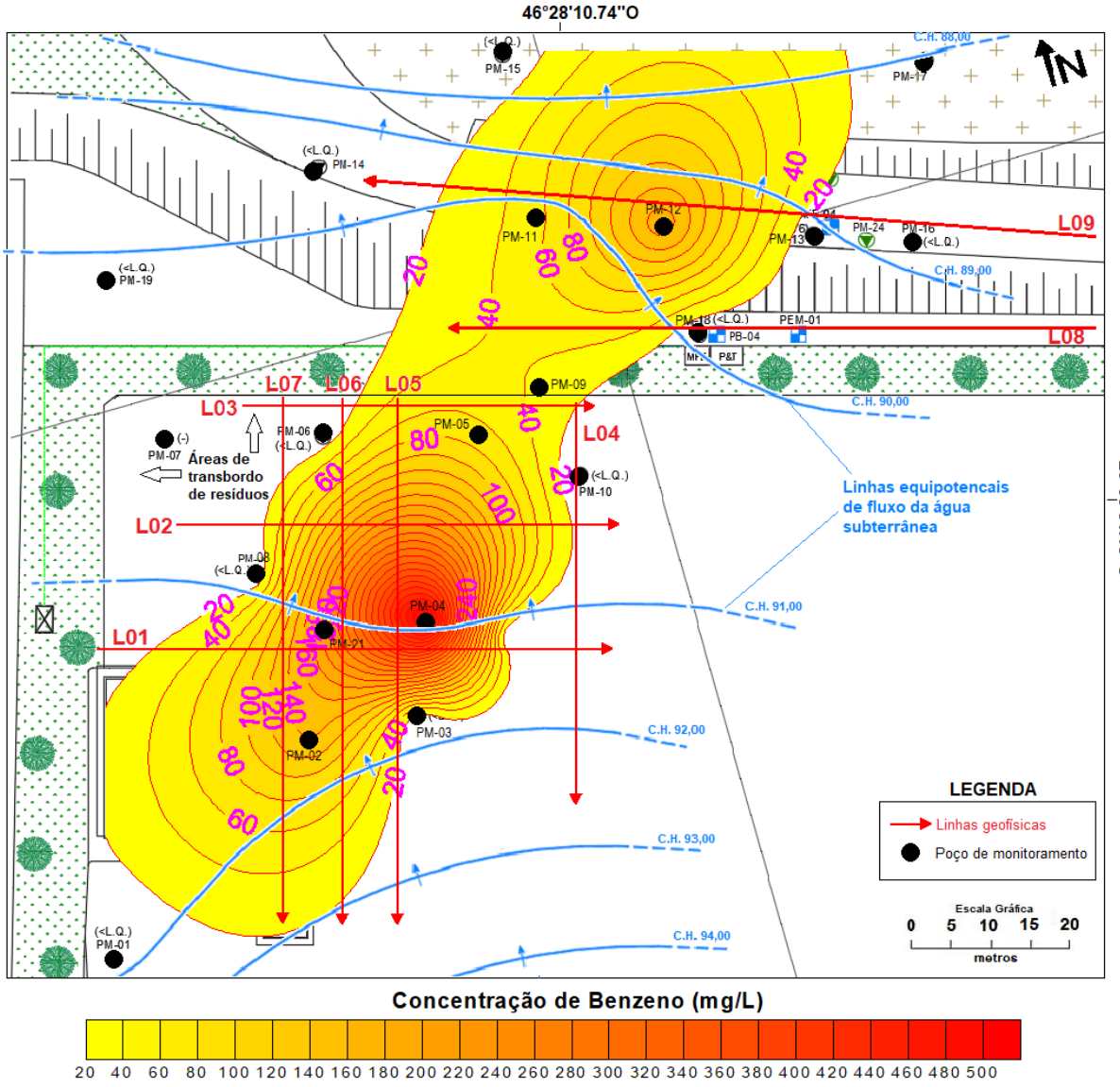
Poço de monitoramento	Profundidade do poço (m)	Cota topográfica relativa (m)	Nível d´água medido (m)	Carga hidráulica (m)	Espessura de fase livre (m)	Benzeno (mg/L)
PM-01	11,50	100,23	8,45	91,78	-	< LQ
PM-02	12,50	101,27	9,45	91,82	0,03	144,0
PM-03	12,05	100,80	9,12	91,68	-	< LQ
PM-04	10,51	100,20	9,24	90,96	oleosidade	538,0
PM-05	12,00	99,75	9,38	90,37	oleosidade	68,0
PM-06	11,90	99,91	9,54	90,37	-	< LQ
PM-08	12,34	100,71	9,72	90,99	-	< LQ
PM-09	12,70	99,70	9,64	90,06	0,03	-
PM-10	12,20	100,05	9,32	90,73	-	< LQ
PM-11	3,11	90,52	0,10	90,42	-	52,0
PM-12	3,60	90,68	1,04	89,64	-	178,0
PM-13	3,50	91,30	2,08	89,22	oleosidade	0,76
PM-14	3,01	89,80	0,02	89,78	-	< LQ
PM-15	2,99	88,10	0,25	87,85	-	< LQ
PM-16	4,01	91,80	3,34	88,46	-	< LQ
PM-17	3,40	88,20	0,00	88,20	-	< LQ
PM-18	10,50	98,30	8,31	89,99	oleosidade	< LQ
PM-19	10,76	98,10	7,93	90,17	-	< LQ
PM-20	9,97	102,50	7,05	95,45	-	< LQ
PM-21	11,75	-	10,33	-	0,47	-

Fonte: Compilado pelo autor.

Na Tabela 4, constam também os resultados das análises químicas realizadas de concentração de benzeno em amostras coletadas nos poços de monitoramento (aferição direta) e que confirmaram a presença de pluma de contaminante orgânico na água subterrânea, decorrente de vazamentos e/ou infiltrações pretéritas de óleo e de combustível dos setores de abastecimento e de lubrificação de caminhões existentes no local.

A partir dos resultados de benzeno na água subterrânea da Tabela 4, foi elaborado o mapa de isoconcentrações deste composto pela plotagem dos pontos de coleta e interpolação dos valores por meio do programa Surfer, versão 13, da Golden Software Inc (Colorado, EUA) com o método de krigagem, apresentado na Figura 61 e onde também constam os posicionamentos das linhas geofísicas realizadas.

Figura 61 - Mapa de isoconcentrações de benzeno e linhas geofísicas.



Fonte: Autoria própria.

Referente ao levantamento geofísico realizado no local, os imageamentos de Resistividade Capacitiva foram realizados com intuito de cruzar a contaminação orgânica mapeada, como visto na Figura 61, além de cobrir os locais não contemplados pelos poços de monitoramento ou de bombeamento.

Deve ser destacada aqui que a localização da Linha L04 apresenta dados fora da região mais contaminada em toda a sua extensão, portanto, representativa do comportamento dos valores naturais de resistividade elétrica dos solos aluvionares existentes em subsuperfície (*background*).

As linhas executadas com o sistema de capacitivo *Ohmmapper TR1* (Figura 62) empregaram extensão do dipolo transmissor, ou do receptor, de 5,0 m de extensão (*C* ou *P*), cordas de separação (*S*) de 1,0, 5,0 e 10,0 m (números múltiplos), o que resulta nas distâncias respectivas entre os centros dos dipolos transmissor e receptor de 6,0, 10,0 e 15,0, e cuja sequência não binária do fator de proporcionalidade *n* é de 0,2; 1,0 e 2,0.

Figura 62 - Levantamento capacitivo na área de transbordo de resíduos.

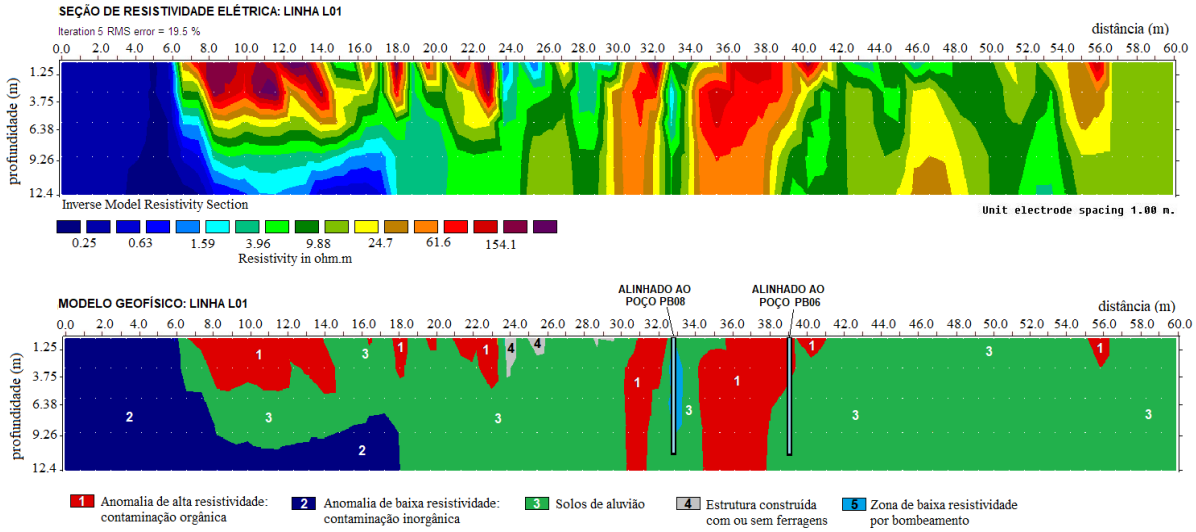


Fonte: O autor.

A seguir, são apresentadas as seções obtidas a partir dos Imageamentos de Resistividade Capacitiva (IRC) executados e seus modelos geofísicos obtidos na inversão de dados pelo programa Res2Dinv (LOKE, 2004), versão 3.54, com indicações de pontos principais de baixas e altas resistividades elétricas associados aos eventuais contaminantes de naturezas distintas (Figuras 63 a 71).

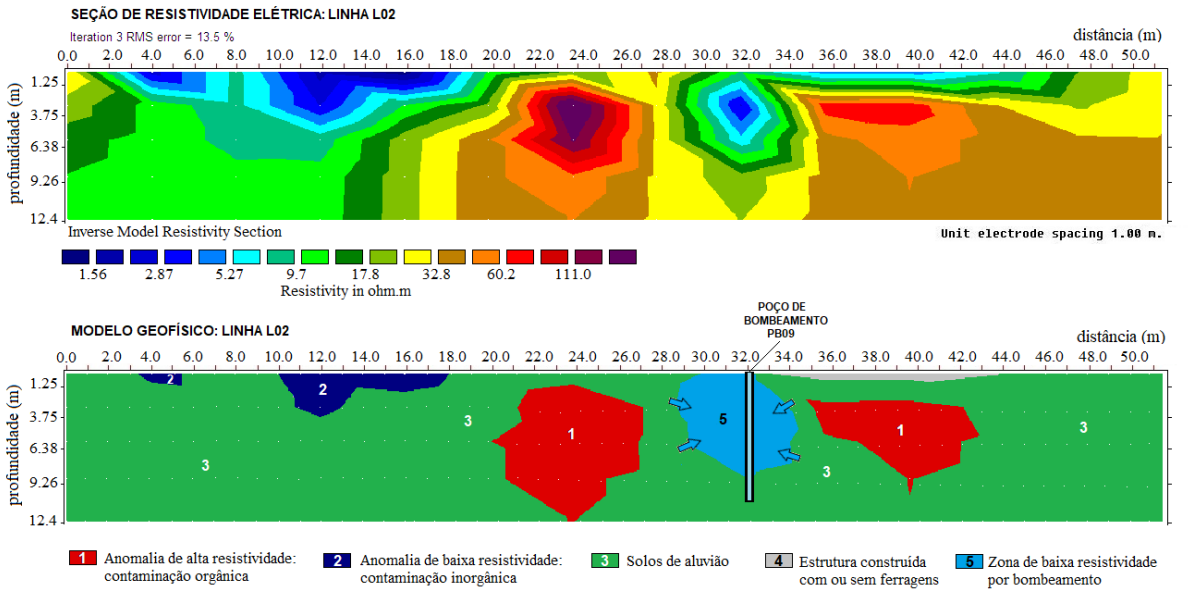
Quanto às amplitudes da escala cromática de resistividade elétrica das seções, seus valores não foram restringidos para que expressassem a variação real das medidas obtidas em campo e pudessem ser avaliados de acordo com o grau de contaminação subterrânea.

Figura 63 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L01.



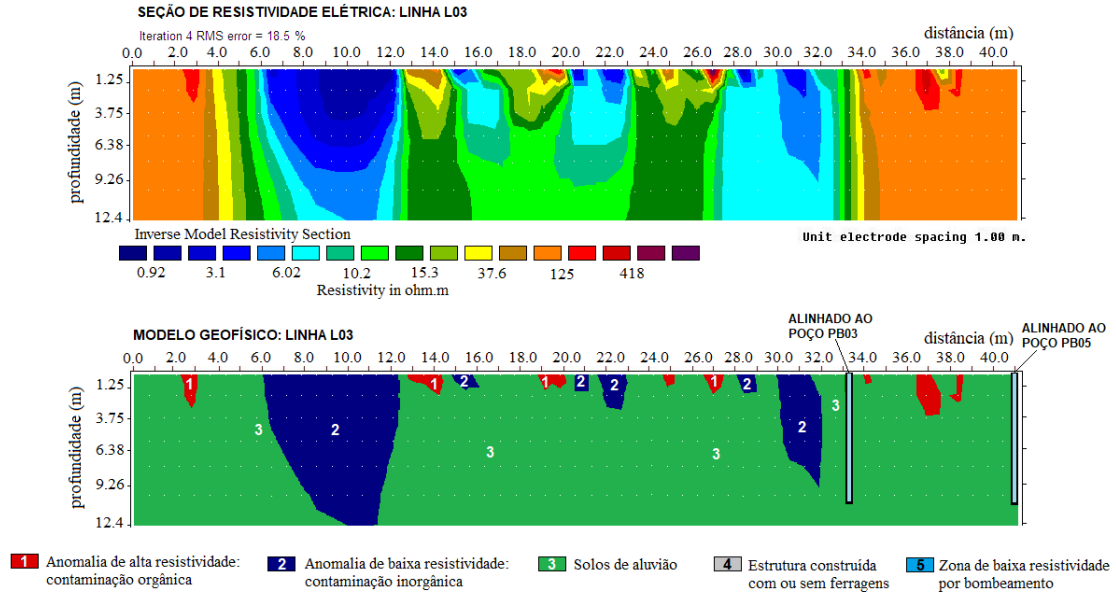
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 64 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L02.



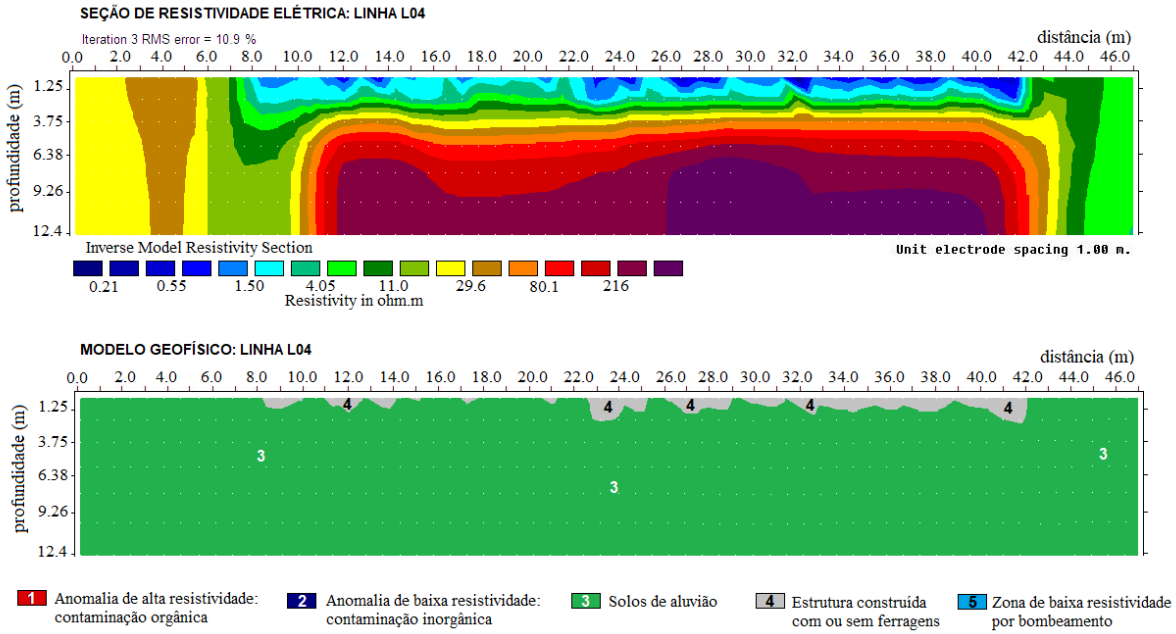
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 65 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L03.



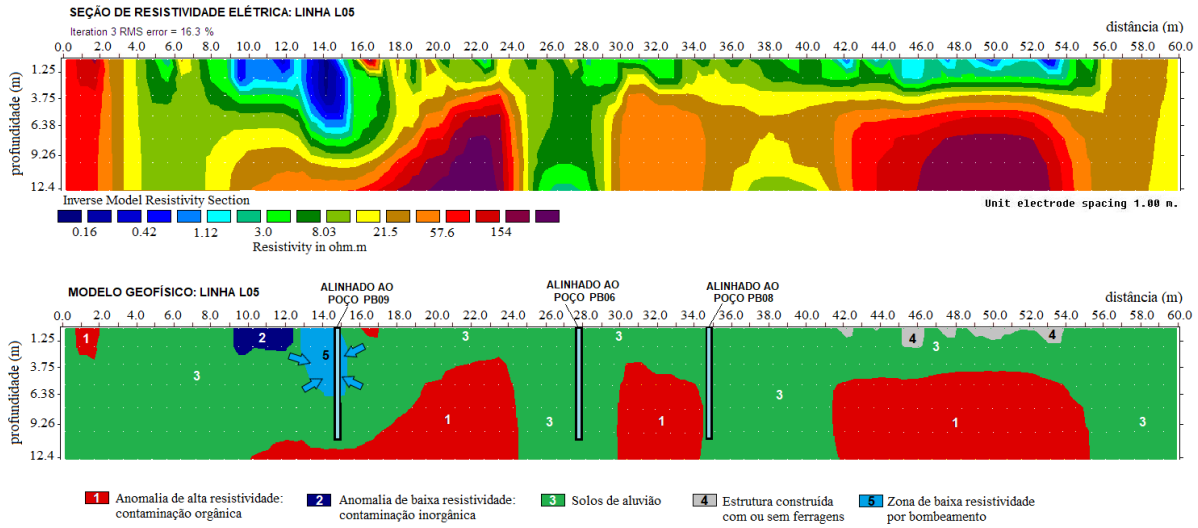
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 66 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L04.



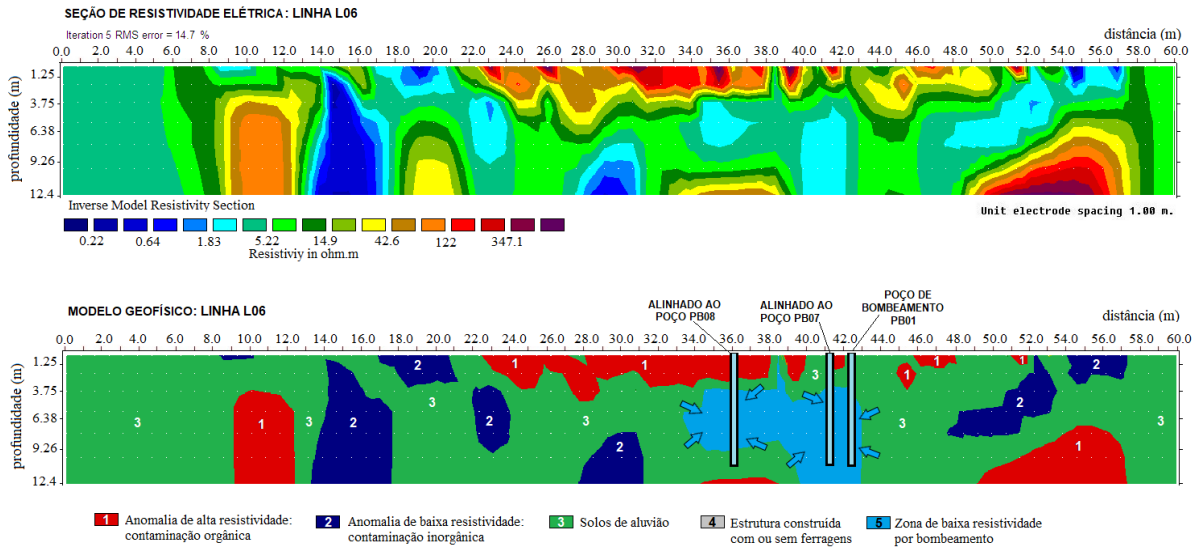
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 67 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L05.



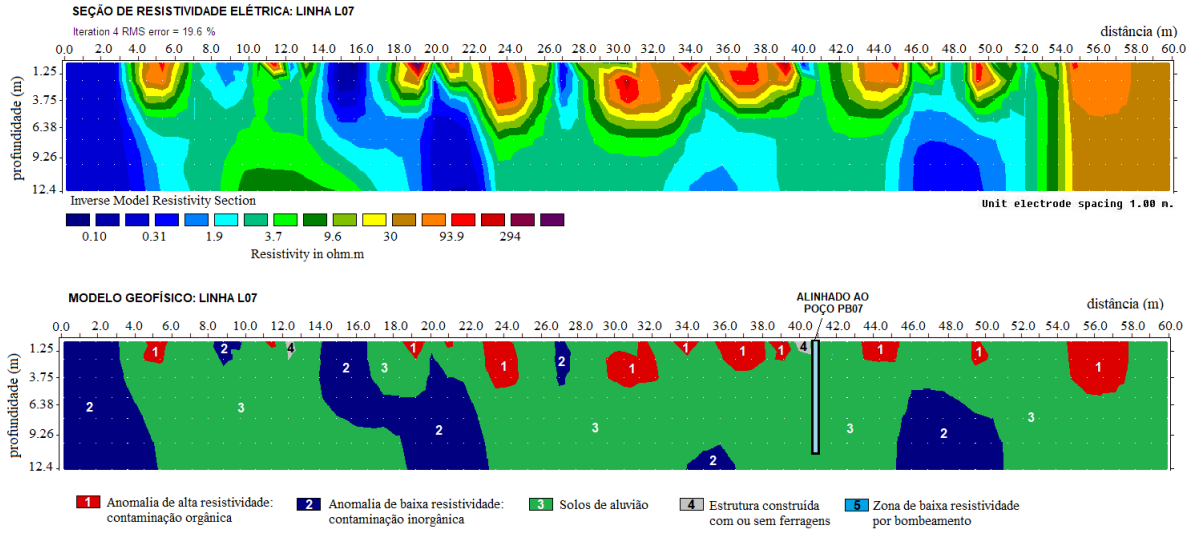
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 68 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L06.



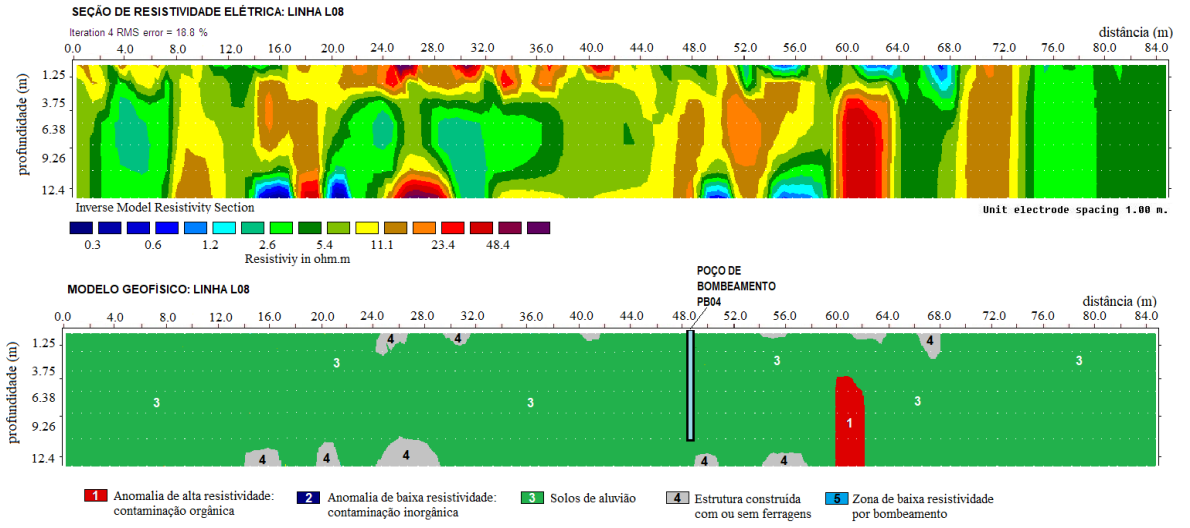
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 69 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L07.



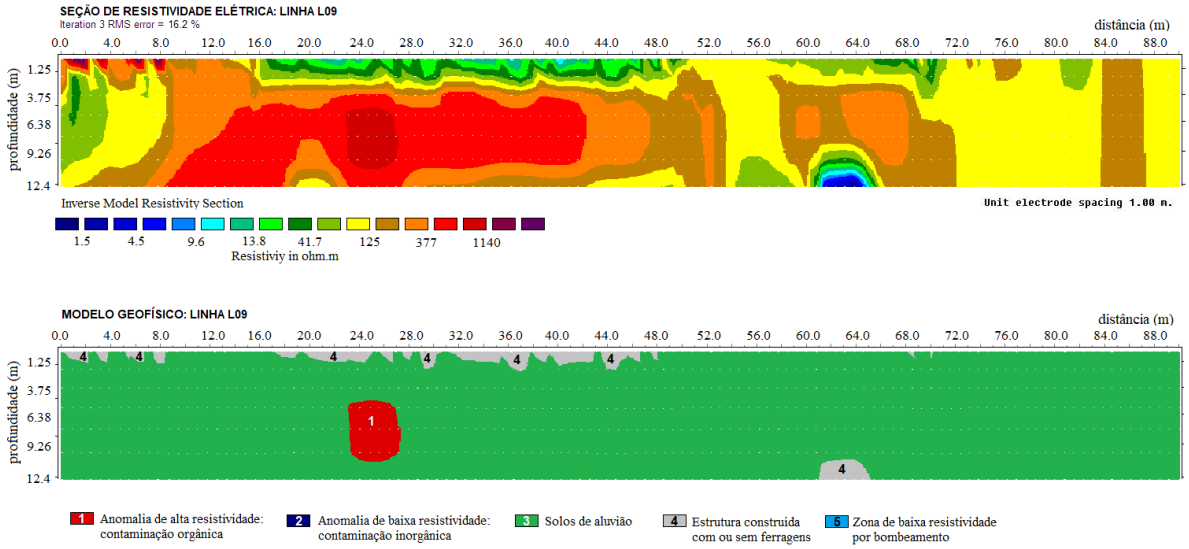
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 70 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L08.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 71 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha L09.



Fonte: Dados da pesquisa.

Em função das separações adotadas de cordas de 1,0, 5,0 e 10,0 m entre os dipolos, o modelamento estabeleceu 1,0 m como menor unidade de medida de interpolação de dados e que nas imagens está representada pelo termo *unit electrode spacing.*

A maioria das seções obtidas no levantamento de Resistividade Capacitiva apresentaram grande perturbação do sinal elétrico e variações significativas nos valores de resistividade, onde são presentes feições descontínuas, com contornos e contatos bem irregulares, associadas a maior presença de contaminação subterrânea.

O aspecto dessas seções é bem distinto quando comparado ao da seção da linha L04 (Figura 66) que mostra um padrão estratificado (horizontalizado) e mais uniforme das resistividades elétricas, que é indicativo do comportamento dos solos siltosos e arenosos da área, isentos dos efeitos da contaminação subterrânea (*background*).

Merece destaque que nas extremidades dessas seções, muitas vezes, são observadas variações de resistividades elétricas que produzem padrões verticalizados, isto porque nesses posicionamentos há menos dados adquiridos para interpolação. Assim, os contatos das feições interpretadas no início e final das imagens modeladas são considerados com ressalvas.

Conforme os intervalos de resistividade elétrica e configurações observadas nas seções obtidas, a interpretação das feições que aparecem nos modelos geofísicos é subdividida em:

1. Anomalias de baixas resistividades elétricas: relacionadas aos prováveis compostos inorgânicos e associadas ao chorume infiltrado;
2. Anomalias de maiores resistividades elétricas: correspondentes aos compostos orgânicos e referente à contaminação subterrânea por combustível ainda não degradado;
3. Solos aluvionares: zonas de resistividades intermediárias com variações naturais por possíveis diferenças de umidade, saturação e/ou teor de quartzo;
4. Estruturas construídas contendo ou não ferragens (galerias, pavimentos, etc);
5. Zonas de baixas resistividades por influência do bombeamento.

Quanto à correspondência da presença de chorume com as anomalias de baixos valores de resistividade elétrica, como constatado pela aplicação da Eletrorresistividade galvânica por Moreira & Braga (2009), de forma geral, esta substância originada por degradação dos resíduos domiciliares pode apresentar elevadas concentrações de sólidos totais dissolvidos no aquífero, compostos orgânicos, amônia e compostos inorgânicos, como o ácido acético e os metais pesados.

Referente aos maiores valores de resistividade elétrica e que podem estar correlacionados à presença subterrânea de combustíveis por conta do vazamento em 2010, o diesel e alguns de seus compostos (naftaleno, antraceno, pireno e criseno) apresentam valores muito elevados, da ordem de mais de 10^7 ohm.m, como mostra a Tabela 1, que resultam no ambiente geológico em anomalias de alta resistividade quando a contaminação é relativamente recente, ou baixa resistividade quando o evento é mais antigo, ambos comportamentos observados no trabalho de Pellerin & Groom (2003) por meio da Resistividade Capacitiva.

Desta forma, a partir da avaliação das seções obtidas, foi possível estabelecer as faixas de resistividade elétrica (em ohm.m) representativas das feições ambientais e geológica interpretadas nos modelos geofísicos e que são apresentadas a seguir na Tabela 5.

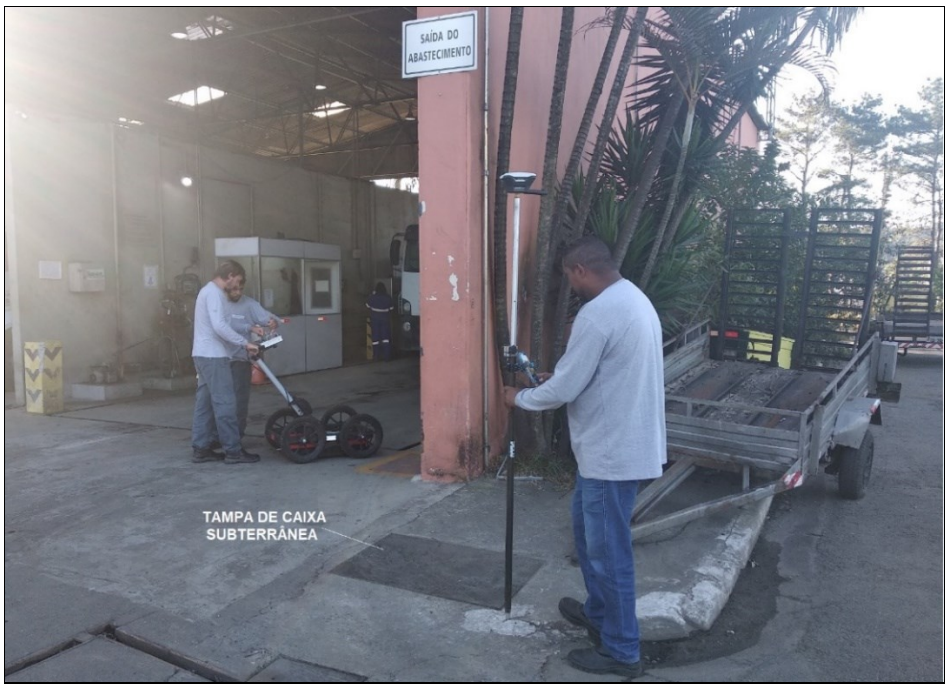
Tabela 5 - Resistividades das feições interpretadas na área de transbordo.

Linha	Anomalia de menores resistividades (ohm.m)	Faixa de resistividade dos solos aluvionares (ohm.m)	Anomalia de maiores resistividades (ohm.m)
L01	< 2,77	de 2,77 a 44,6	> 44,6
L02	< 5,27	de 5,27 a 46,5	> 46,5
L03	< 6,02	de 6,02 a 125,0	> 125,0
L04	-	de 20,3 a 80,1	-
L05	< 3,00	de 3,00 a 39,5	> 39,5
L06	< 3,52	de 3,52 a 42,6	> 42,6
L07	< 1,90	de 1,90 a 61,9	> 61,9
L08	< 1,90	de 1,90 a 35,9	> 35,9
L09	-	de 13,8 a 758,5	> 758,5

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados indicam a presença de várias anomalias rasas de maiores resistividades elétricas que podem ser correlacionadas aos vazamentos de instalações subterrâneas, por exemplo tanques de armazenamento, linhas de abastecimento, caixas (Figura 72), ou seja, as fontes primárias de contaminação.

Figura 72 – Tampa de caixa subterrânea existente na área.



Fonte: O autor.

Além dessas anomalias mais superficiais, são constatadas zonas anômalas mais profundas de maiores resistividades nas seções L01, L02, L05, L06, L08 e L09, respectivamente Figuras 63, 64, 65, 67, 68, 70 e 71, associadas à fase residual de combustível, indicando a permanência de fontes secundárias de contaminação subterrânea.

É importante salientar que algumas regiões de altas resistividades elétricas em níveis mais profundos, referente à fase residual na água subterrânea, estão divididas pela influência dos poços de bombeamento, o que pode ser melhor visualizado nas seções e modelos das linhas L01, L02 e L05 (Figuras 63, 64 e 67).

Este aspecto pode ser visualizado, principalmente, na imagem da Linha L02 (Figura 64) que apresenta duas zonas de alta resistividade à direita e à esquerda do local onde está posicionado o poço PB09, que podem se constituir nas plumas de combustíveis em fase residual no aquífero, e uma zona central de convergência de baixa resistividade elétrica interpretada como o raio de influência do bombeamento e que extraí água com fase dissolvida ao não ter mais produto em fase livre para remover, daí a ineficiência desse poço para remediação na data do trabalho.

Além da Linha L02, as seções das Linhas L05 e L06, respectivamente Figuras 67 e 68, apresentaram o mesmo comportamento de convergência de baixas resistividades elétricas quando da presença ou proximidade com poços de bombeamento, com zona de influência na Linha L06 decorrente da conjunção dos efeitos dos poços PB01, PB07 e PB08.

Outra consideração importante se refere à constatação de anomalias superficiais de maiores resistividades elétricas na seção da linha L01 (Figura 63) entre as distâncias de 7,0 a 23,0 m, as quais podem corresponder aos processos de vazamentos de combustíveis provenientes das instalações rasas ali existentes, uma vez que o perfil, neste trecho, cruza a frente da área de abastecimento, troca de óleo e lavagem (Figura 73), e que são as prováveis fontes principais da contaminação orgânica verificada na área.

Figura 73 – Local de abastecimento, lubrificação e lavagem.



Fonte: O autor.

De modo geral, às zonas anômalas de baixas resistividade elétricas, associadas à eventual penetração de chorume através do piso local, são observadas nas seções L01, L02, L03, L05, L06 e L07 e onde esses contaminantes inorgânicos podem ter atingido a água subterrânea nas linhas L01, L03, L06 e L07 (Figuras 63, 65, 68 e 69).

Quanto aos posicionamentos das anomalias de menores resistividades elétricas descritas nas seções anteriores, algumas apresentam posicionamentos próximos aos locais de lavagem e abastecimento (L1, L6 e L7), que são fontes potenciais de contaminação subterrânea, e outros trechos anômalos (L1, L3 e L7) coincidem com a localização da área de transbordo de resíduos, origem provável da infiltração de chorume que provocou os menores valores anômalos detectados nesses pontos (Figura 74).

Figura 74 – Chorume observado sobre o piso da área de transbordo.



Fonte: O autor.

Em relação ao ambiente geológico natural (*background*) e capacidade de detecção pelo aparato capacitivo das anomalias de baixas resistividades elétricas associadas aos contaminantes inorgânicos, ocorrem valores muito reduzidos nas seções, seja em porções mais siltosas ou mais arenosas, e, de forma geral, se encontram numa mesma de faixa de variação, como visto na Tabela 5.

Deve ser destacado aqui que os valores anomalamente reduzidos de resistividade elétrica em diversos pontos, em função da presença presumível de chorume, fazem com que nesses locais específicos o meio deixe de apresentar as condições de regime *quasi-estático* ao método de Resistividade Capacitiva, fator que intensifica a condição anômala em subsuperfície.

Como exemplo disso, é possível calcular um limite de resistividade elétrica para determinada profundidade de investigação, onde as medidas abaixo deste valor deverão alterar o regime *quasi-estático* do ambiente. Por meio da fórmula do parâmetro *skin-depth* (equação 3.15), consideradas a frequência e 16,5 kHz do

equipamento *Ohmmapper* e uma profundidade intermediária das seções de 6,25 m, a resistividade elétrica limite será de 2,55 ohm.m para este nível.

Assim, é possível calcular as resistividades elétricas limites do regime *quasi-estatico* do *skin depth* para as demais profundidades, com base nos níveis de amostragem da sequência binária do fator *n* e que são apresentadas na tabela a seguir (Tabela 6).

Tabela 6 - Resistividades elétricas limites do regime *quasi-estático*.

Profundidade (m)	Resistividade elétrica limite (ohm.m)	Profundidade (m)	Resistividade elétrica limite (ohm.m)
1,25	0,10	8,75	5,00
2,50	0,41	10,00	6,53
3,75	0,92	11,25	8,26
5,00	1,63	12,50	10,20
6,25	2,55	13,75	12,34
7,50	3,67	15,00	14,68

Fonte: Dados da pesquisa.

Diferentemente do efeito observado para a contaminação inorgânica, a correlação entre o ambiente e os valores anômalos de maiores resistividades elétricas provocados por eventual presença de contaminantes orgânicos permite concluir que a faixa de variação de resistividade medida será dependente do tipo de litologia existente (*background*).

Portanto, quando observado o comportamento das anomalias de resistividades elétricas de maiores valores nas seções obtidas, é possível constatar que a fase residual da contaminação orgânica é evidente, por exemplo nas seções L01, L02, L05 e L06 (Figuras 63, 64, 67 e 68), porém com valores anômalos não tão altos (Tabela 5).

Por outro lado, quando o ambiente é constituído por material arenoso, onde a resistividade elétrica é naturalmente alta (*background*), o contaminante orgânico provoca o aparecimento de valores anômalos de resistividade elétricas bem mais elevados em subsuperfície, como é o caso da seção L09 (Figura 71).

Cabe salientar que o perfil L09 foi executado em local externo à área e com cota topográfica mais baixa que as demais seções por ser um corte no terreno natural (Figura 75), onde o material geológico é, predominantemente, mais arenoso de acordo com as descrições das sondagens realizadas.

Figura 75 – Local externo de realização da linha capacitiva L09.



Fonte: o autor.

Desta forma, os dados desta pesquisa indicam que os valores anômalos de resistividade elétrica produzidos em subsuperfície por um composto orgânico contaminante variam de acordo com a resistividade natural do ambiente (*background*), numericamente maiores em condições mais arenosas.

Com base nas discussões anteriores, é apresentado na tabela a seguir um resumo referente ao observado para as anomalias de resistividade elétricas de contaminação subterrânea, levando-se em conta a natureza do contaminante, as faixas de valores anômalas abrangidas e suas características no ambiente (Tabela 7).

Tabela 7 – Características das anomalias de resistividades elétricas.

Contaminante	Resistividade elétrica	Anomalia em solo pouco resistivo	Anomalia em solo muito resistivo	Observação
Inorgânico	Baixa	Baixa	Baixa	- Altera o regime *quasi-estático;* - Valores anômalos independem do tipo de solo.
Orgânico	Alta	Alta	Muito elevada	- Valores anômalos dependem do tipo de solo.

Fonte: Dados da pesquisa.

Quanto a uma eventual interferência na aquisição de dados em função do tipo de pavimento da área, que é constituído por concreto armado para suportar o movimento de caminhões, foi observado que este não interferiu nas medidas de resistividade elétrica obtidos pela aplicação da Resistividade Capacitiva.

A presença dos caminhões e contêineres próximos aos locais de execução dos perfis (Figura 76), o que inviabilizaria o uso de antenas GPR não blindadas por exemplo, não influenciou a qualidade dos dados medidos de resistividade elétrica pelo aparato capacitivo por serem corpos massivos metálicos, inversamente ao constatado anteriormente quanto à interferência de objetos formando malhas metálicas (grelhas, alambrados, etc) nas medições capacitivas dos ensaios controlados.

Figura 76 – Linha capacitiva executada entre caminhões de coleta.



Fonte: o autor.

A partir da avaliação das seções anteriores, foi elaborada a Tabela 8, com os posicionamentos dos trechos anômalos de menores e maiores de resistividades elétricas nos níveis mais profundos (zona saturada) relacionados, respectivamente, à contaminação inorgânica decorrente do chorume e às fases residuais de combustível como apontam os resultados das análises de benzeno na água subterrânea (Figura 77).

Tabela 8 - Trechos anômalos da contaminação na água subterrânea.

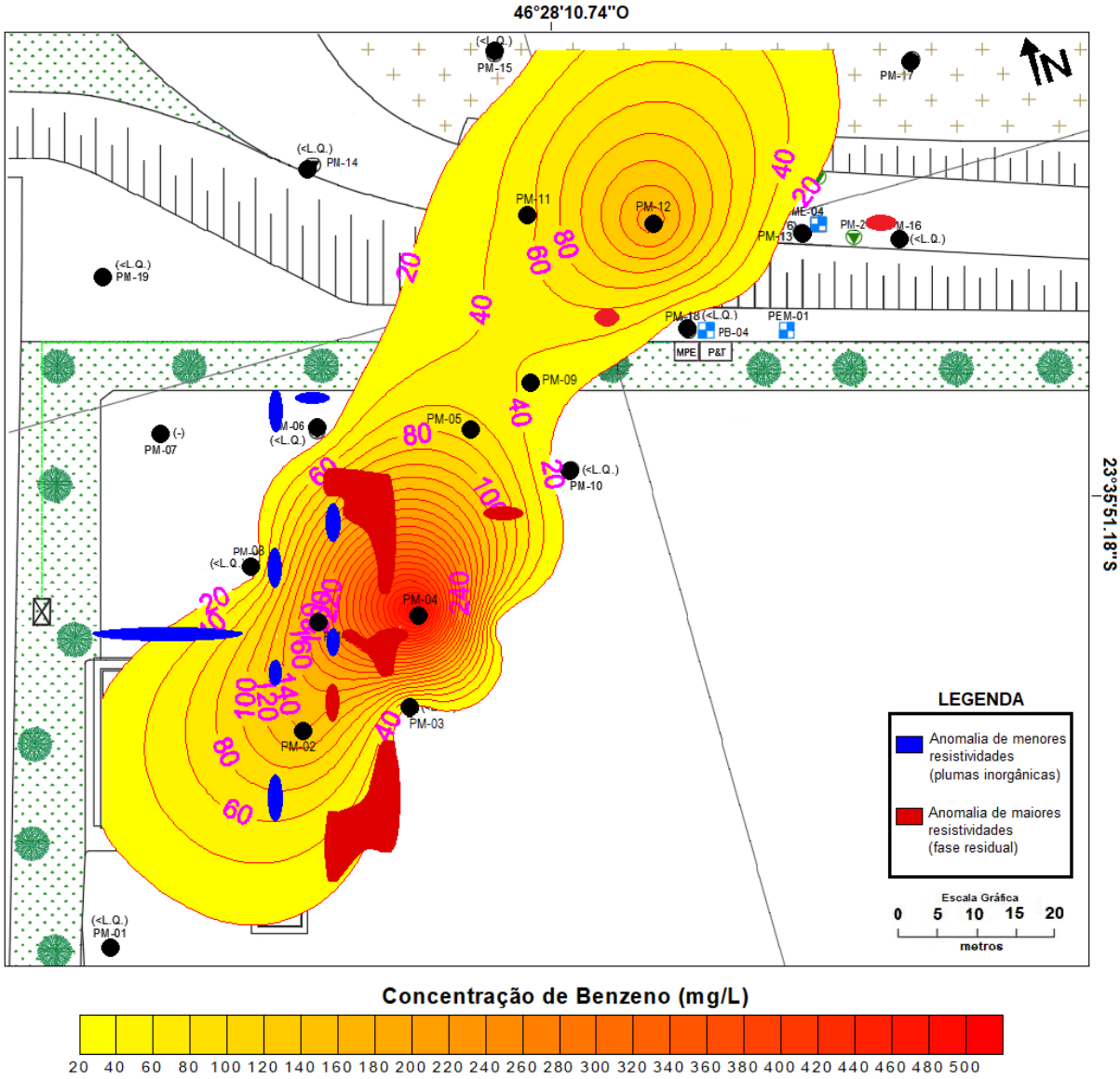
Linha	Anomalia de menores resistividades elétricas (contaminação inorgânica)	Anomalia de maiores resistividades elétricas (fases residuais)
L01	0,0 a 18,0 m	30,5 a 31,5 m
	-	34,5 a 38,0 m
L02	-	20,5 a 25,5 m
	-	38,0 a 41,0 m
L03	-	-
L04	-	-
L05	-	10,0 a 24,0 m
	-	30,0 a 34,0 m
	-	42,0 a 55,0 m
L06	13,5 a 17,5 m	9,5 a 12,5 m
	28,0 a 31,0 m	34,0 a 38,5 m
	-	49,0 a 57,0 m
L07	0,0 a 5,5 m	-
	19,0 a 23,0 m	-
	34,0 a 36,5 m	-
	45,0 a 50,5 m	-
L08	-	59,5 a 62,0 m
L09	-	23,0 a 27,0 m

Fonte: Dados da pesquisa.

Posteriormente, os trechos anômalos verificados de altas e baixas resistividade elétricas, que constam da Tabela 7, foram plotados na planta da área sobre as linhas executadas do levantamento capacitivo e interpolados os contornos de anomalias que estivesses próximas, ou paralelas, para uma visualização mais representativa das porções contaminadas da água subterrânea, cujos

posicionamentos sobrepostos aos valores de isoconcentração de benzeno são apresentados na sequência na Figura 77.

Figura 77 - Anomalias de resistividades elétricas na zona saturada.



Fonte: Dados da pesquisa.

Ao comparar as localizações das porções anômalas de maiores resistividades elétricas do levantamento geofísico de 2019 com o mapeamento da contaminação por benzeno de 2018 (Figura 77), é nítida uma mudança significativa da abrangência da eventual pluma de contaminação orgânica. Estes resultados indicam a existência remanescente de fase residual, apontando que os trabalhos de remediação através de bombeamento surtiram efeito na área pesquisada, mas que não eliminaram totalmente os contaminantes orgânicos da água subterrânea.

Quanto à dimensão das anomalias de altas resistividade elétricas, estas possuem maiores dimensões próximas das fontes principais de contaminação do local (áreas de abastecimento, lavagem e troca de óleo), além de uma tendência de distribuição no sentido nordeste e que é concordante ao sentido de fluxo da pluma de contaminação original.

Nos resultados da Figura 77 existem anomalias de baixas resistividades elétricas distribuídas de forma difusa no flanco leste da área e que podem apontar a contaminação da água subterrânea decorrente da infiltração a partir da superfície em função da movimentação frequente dos caminhões neste local, principalmente nos pontos de transbordo de resíduos domiciliares e nos próximos do abastecimento, troca de óleo e lavagem.

Como descrito anteriormente, foi aplicado também o método de *GPR* para diagnóstico da porção interna da área de transbordo de resíduos em perfis coincidentes com as linhas L01 a L07 da Resistividade Capacitiva (Figura 61), com emprego do equipamento modelo localizador multifrequencial *Easy Locator Pro Widerange HDR* (Figura 78).

Figura 78 - Levantamento GPR na área de transbordo de resíduos.



Fonte: O autor.

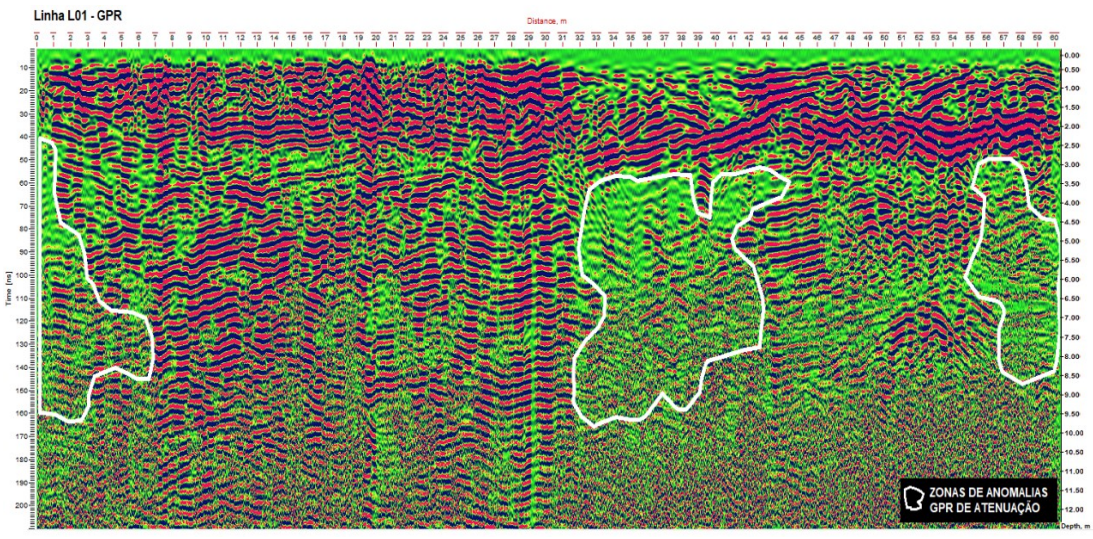
A aquisição de dados realizada através de perfilagem contínua, com intervalo de medidas a cada 2,3 cm, com 1002 amostras por traço, janela de tempo de 208 ns e arranjo dipolo (ou common offset), com separação constante de 0,33 metros entre as antenas blindadas transmissora e receptora de baixas frequências de operação.

Segundo diversos pesquisadores, em estudos com aplicação do método de *GPR* em áreas contaminadas é perceptível observar visualmente o fenômeno da atenuação da onda eletromagnética nas seções obtidas como uma zona de ausência ou de diminuição da intensidade do sinal decorrente da presença de compostos inorgânicos ou orgânicos (DAVID & ANNAN, 1989; NOBES *et al.*, 1994; DANIELS *et al.*, 1995; AQUINO, 2000; DEHAINI, 2001; ALMEIDA *et al.*, 2017).

Apesar deste efeito ter natureza distinta para as substâncias orgânicas e para as inorgânicas, este comportamento de decréscimo da reflexão do sinal *GPR* (atenuação) gera as denominadas “zonas de sombra” (*shadow zones*) de acordo com esses autores, em consequência da presença de maiores concentrações desses contaminantes em subsuperfície (*hot spots*).

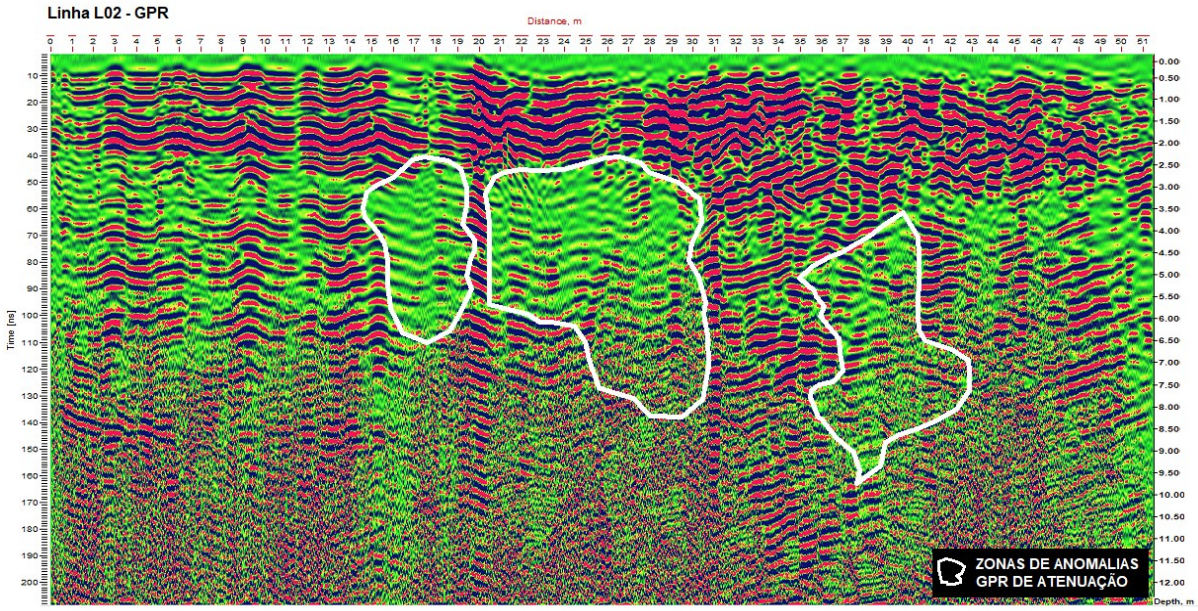
Neste contexto, são essas anomalias de atenuação do sinal, correlacionadas aos eventuais contaminantes ambientais em subsuperfície, que serão o alvo da interpretação e delimitação de seus contornos nas seções *GPR* apresentadas na sequência desta pesquisa.

Figura 79 – Seção GPR da Linha L01.



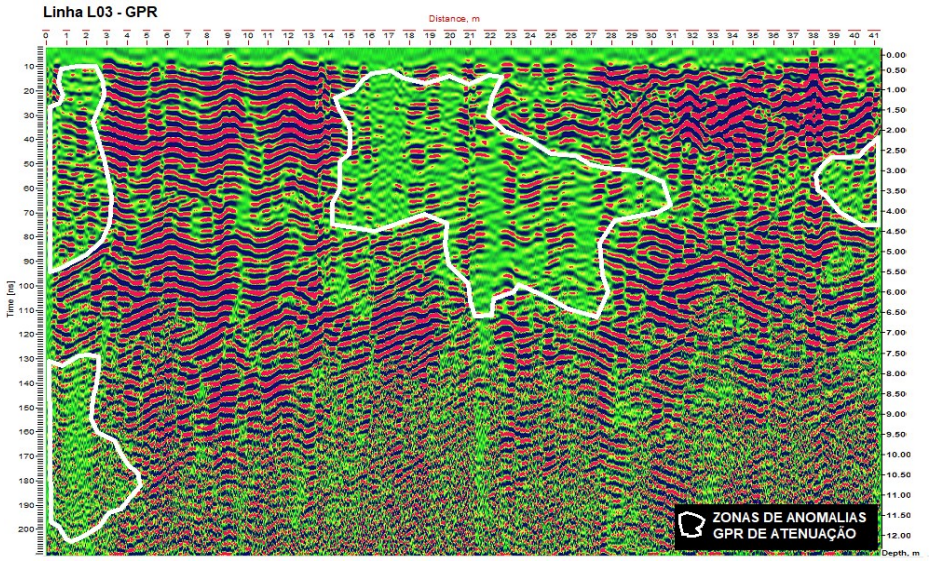
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 80 – Seção GPR da Linha L02.



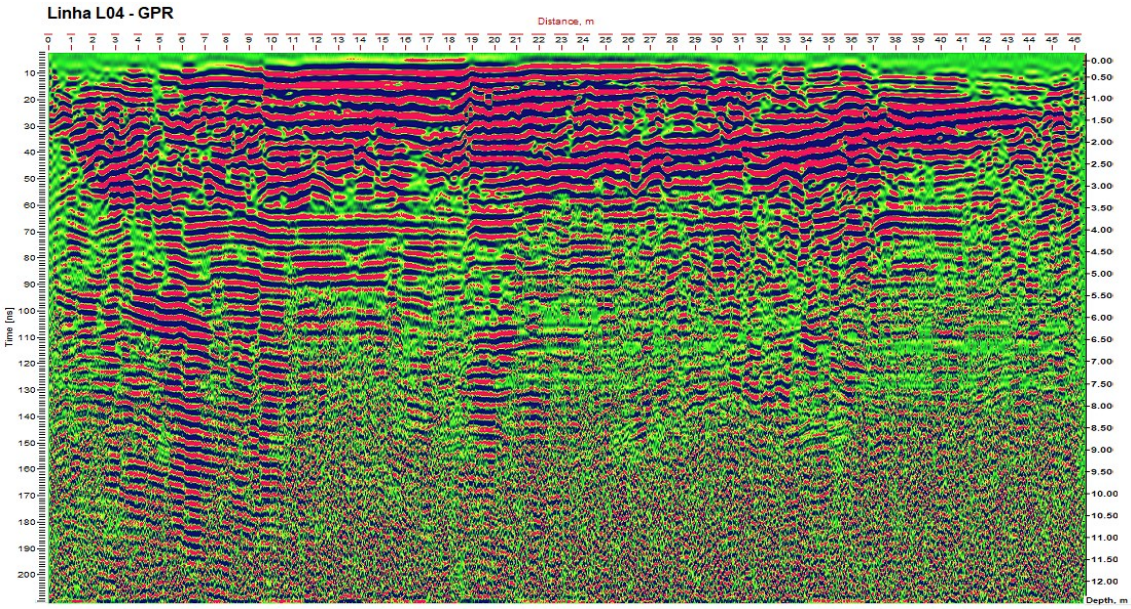
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 81 – Seção GPR da Linha L03.



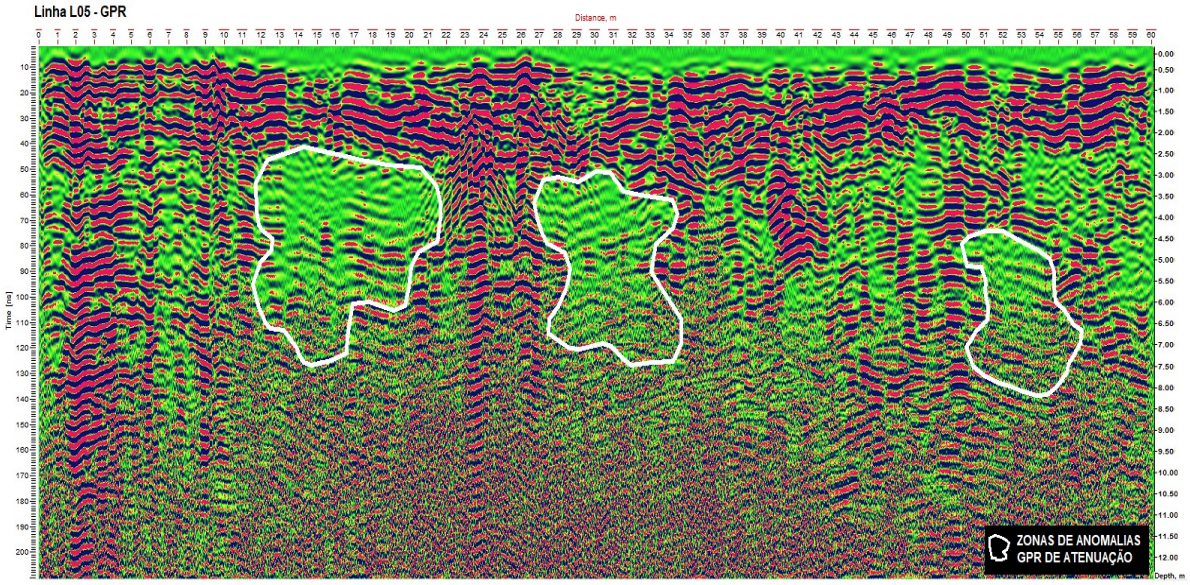
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 82 – Seção GPR da Linha L04 (background).



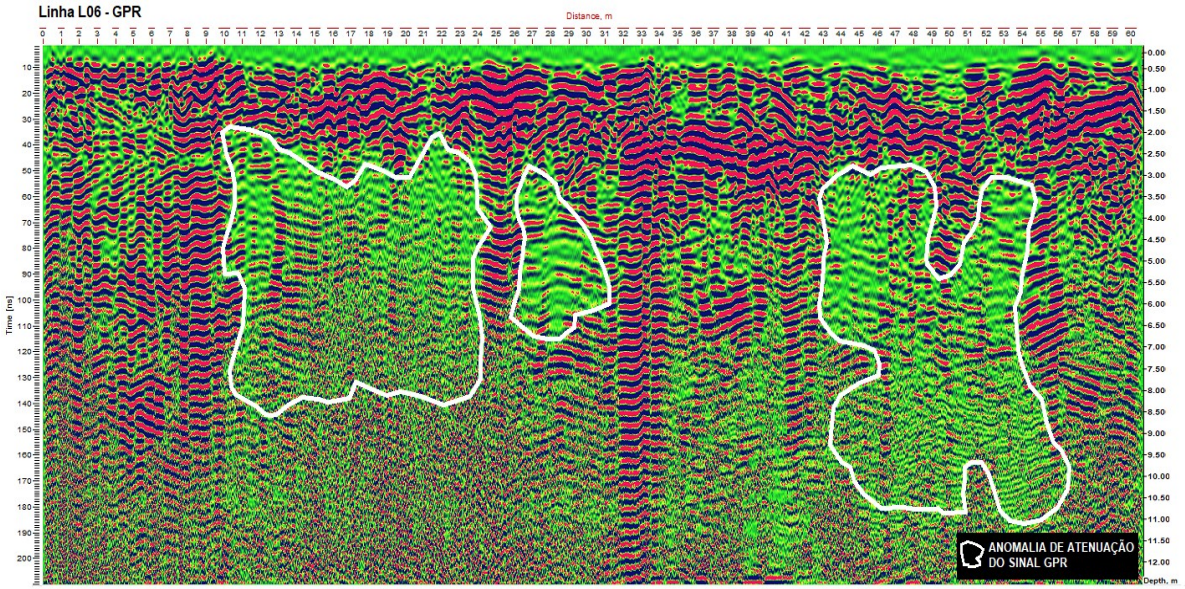
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 83 – Seção GPR da Linha L05.



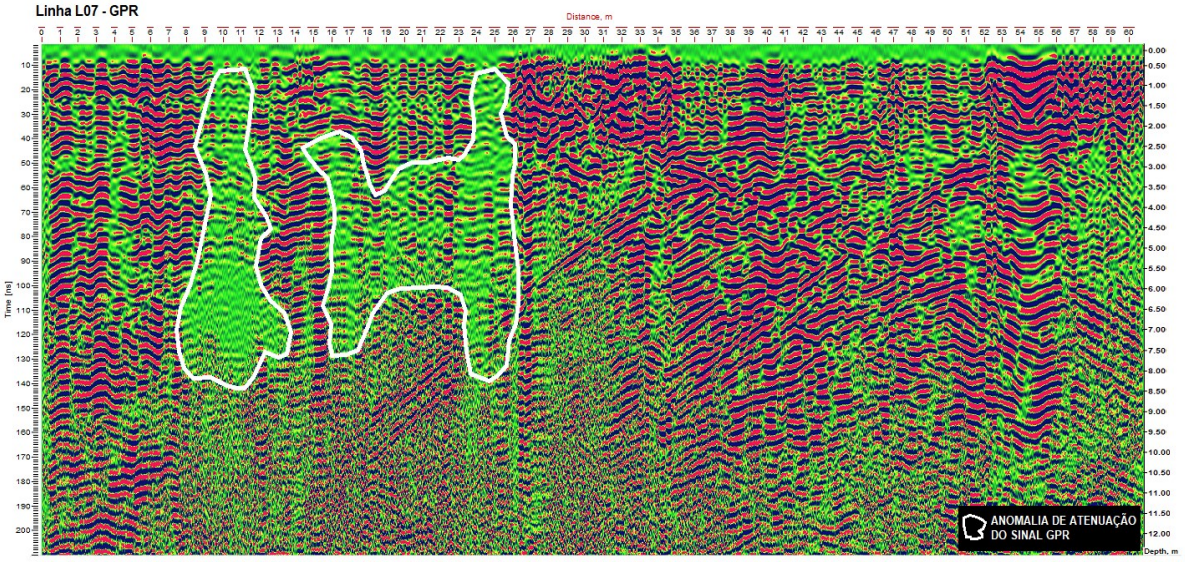
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 84 – Seção GPR da Linha L06.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 85 – Seção GPR da Linha L07.



Fonte: Dados da pesquisa.

Com exceção da seção L04 (Figura 82), cujo perfil está fora da área de contaminação (*background*), foi possível verificar anomalias de atenuação do sinal *GPR* associadas à presença de contaminantes nas demais seções elaboradas, sendo seus posicionamentos expressos na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Posicionamento das anomalias de *GPR* na área de transbordo.

Perfil	Trecho Anômalo	Faixa de Profundidade
L01	0,0 a 7,0 m	2,5 a 9,7 m
	31,5 a 44,5 m	3,1 a 9,7 m
	54,7 a 60,5 m	2,8 a 8,8 m
L02	14,5 a 19,7 m	2,5 a 6,6 m
	20,5 a 30,6 m	2,4 a 8,3 m
	35,0 a 42,7 m	3,7 a 9,8 m
L03	0,0 a 3,2 m	0,5 a 5,0 m
	0,0 a 4,5 m	7,8 a 12,2 m
	14,0 a 39,5 m	0,7 a 6,7 m
	38,2 a 41,5 m	2,2 a 4,4 m
L04	-	-
L05	11,8 a 21,6 m	2,3 a 7,4 m
	26,9 a 34,7 m	3,1 a 7,4 m
	50,0 a 56,1 m	4,3 a 8,2 m
L06	9,9 a 24,8 m	1,9 a 8,5 m
	26,0 a 31,4 m	2,9 a 6,8 m
	42,7 a 56,3 m	2,8 a 11,0 m
L07	7,2 a 13,5 m	0,7 a 8,4 m
	14,4 a 26,1 m	0,5 a 8,3 m

Fonte: Dados da pesquisa.

Referente ao levantamento de campo, deve ser apontado que os tempos dispendidos para montagem e acesso aos sistemas operacionais dos equipamentos *Ohmmapper* e *Easy Locator Pro Widerange HDR*, bem como suas velocidades de aquisição, são similares, de cerca de nove minutos. Porém, como o método de Resistividade Capacitiva necessita de mais de um perfil para a elaboração de uma seção de subsuperfície, como visto anteriormente, seu levantamento é mais demorado que o *GPR*, consumindo, de modo geral, duas, três, ou mais vezes, a depender do número de perfis adicionais necessários.

Numa primeira abordagem comparativa entre os resultados obtidos por esses métodos aplicados no estudo em questão, foi verificado que as imagens da Resistividade Capacitiva (Figuras 63 a 71) apresentam anomalias geofísicas em maior

número que as observadas para os perfis correspondentes do *GPR* (Figuras 79 a 85), principalmente quando avaliada profundidades mais rasas, menores que 3,75 m.

Além de apresentar maior quantidade de anomalias, os resultados para o método de Resistividade Capacitiva permitem a detecção de porções anômalas de menores dimensões e com contornos mais bem definidos em relação aos resultados indicados pelo *GPR*, indicativo de maior sensibilidade das medidas de resistividade elétrica para este objetivo.

Outro aspecto importante de diferenciação entre os resultados decorre da definição da profundidade de base das anomalias, que é melhor constatado nas seções da Resistividade Capacitiva em relação ao *GPR*.

Neste contexto, deve ser destacado que a determinação do nível mais profundo da anomalia de atenuação por contaminantes pelo método *GPR* nem sempre é verificada com precisão, principalmente, quando parte da zona anômala está na franja capilar ou na zona saturada, isto porque a saturação do ambiente por água provoca a diminuição da intensidade do sinal de forma natural (DAVIS & ANNAN, 1989).

Portanto, quanto à tipologia das anomalias para determinação dos focos da contaminação subterrânea, os dados da Resistividade Capacitiva possibilitam indicar os pontos de maiores concentrações dos contaminantes por serem resultados expressos por valores numéricos de resistividade elétrica, que, do contrário, é reconhecida visualmente nas imagens de *GPR* como uma região de baixa reflexão do sinal.

Por fim, foi verificado que a Resistividade Capacitiva possui maior potencial para distinção dos locais com presença de contaminantes inorgânicos e orgânicos em subsuperfície, em função de sua capacidade de detecção de medidas de baixos e altos valores anômalos de resistividade elétrica respectivamente. Em contraste, é mais difícil esta diferenciação apenas pela visualização de zonas de atenuação do sinal nos resultados do método de *GPR*, a despeito da alta resolução obtida de seus dados.

Além da identificação das anomalias associadas à contaminação subterrânea, o método de Resistividade Capacitiva aqui empregado possibilitou à identificação de

feições hidrogeológicas correspondentes ao raio de influência de poço de bombeamento e seccionamento das plumas de contaminação orgânicas em função do adensamento dos pontos amostrados adotado (pequenos intervalos de medidas).

Na sequência, é apresentada a Tabela 10 e que ilustra os parâmetros comparativos desta pesquisa entre os métodos de Resistividade Capacitiva e o *GPR* (Geo-radar) de acordo às discussões anteriores reportadas.

Tabela 10 - Comparação entre Resistividade Capacitiva e GPR.

Parâmetros	Resistividade Capacitiva	*GPR* (Geo-radar)	Observação
Tempo total de levantamento	Maior	Menor	Comparado ao equipamento capacitivo monorreceptor.
Profundidade de Investigação	Até 12,4m	Até 12,5m	Específica aos equipamentos e frequências utilizadas.
Resolução dos dados	Alta	Altíssima	-
Detecção de dutos	Possível	Mais adequado	Resistividade Capacitiva apenas em profundidades superiores a 1,0 m.
Detecção de contaminação orgânica	Sim	Sim	-
Detecção de contaminação inorgânica	Sim	Sim	-
Tipologia da anomalia	Valores numéricos	Atenuação do sinal	-
Distinção entre contaminação orgânica ou inorgânica	Possível	Não	-
Detecção de influência do bombeamento	Possível	Não	-

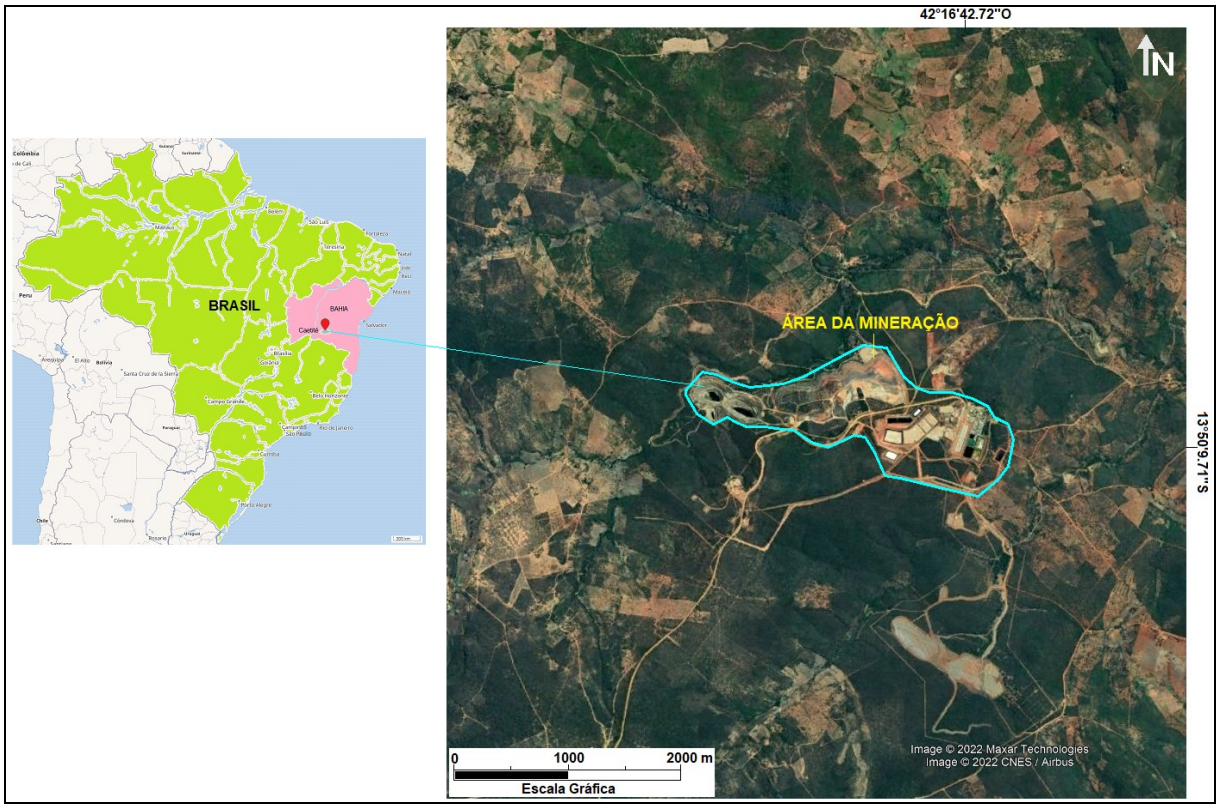
Fonte: Dados da pesquisa.

4.6. Estudo de caso: área de mineração

Este estudo de caso reporta os resultados da aplicação do método de Resistividade Capacitiva em área de beneficiamento mineral de empresa mineradora (Figura 86), situada na região do município de Caetité (BA), e utilizada para a separação e concentração de óxido de urânio (U_30_8).

Neste local, o material removido da frente de lavra de mineração, após trituração, era disposto em pilhas e recebia uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e que, de acordo com Pires (2013), extraía o minério de interesse da matriz rochosa através do processo de lixiviação e drenagem, processo paralisado quando desta pesquisa geofísica.

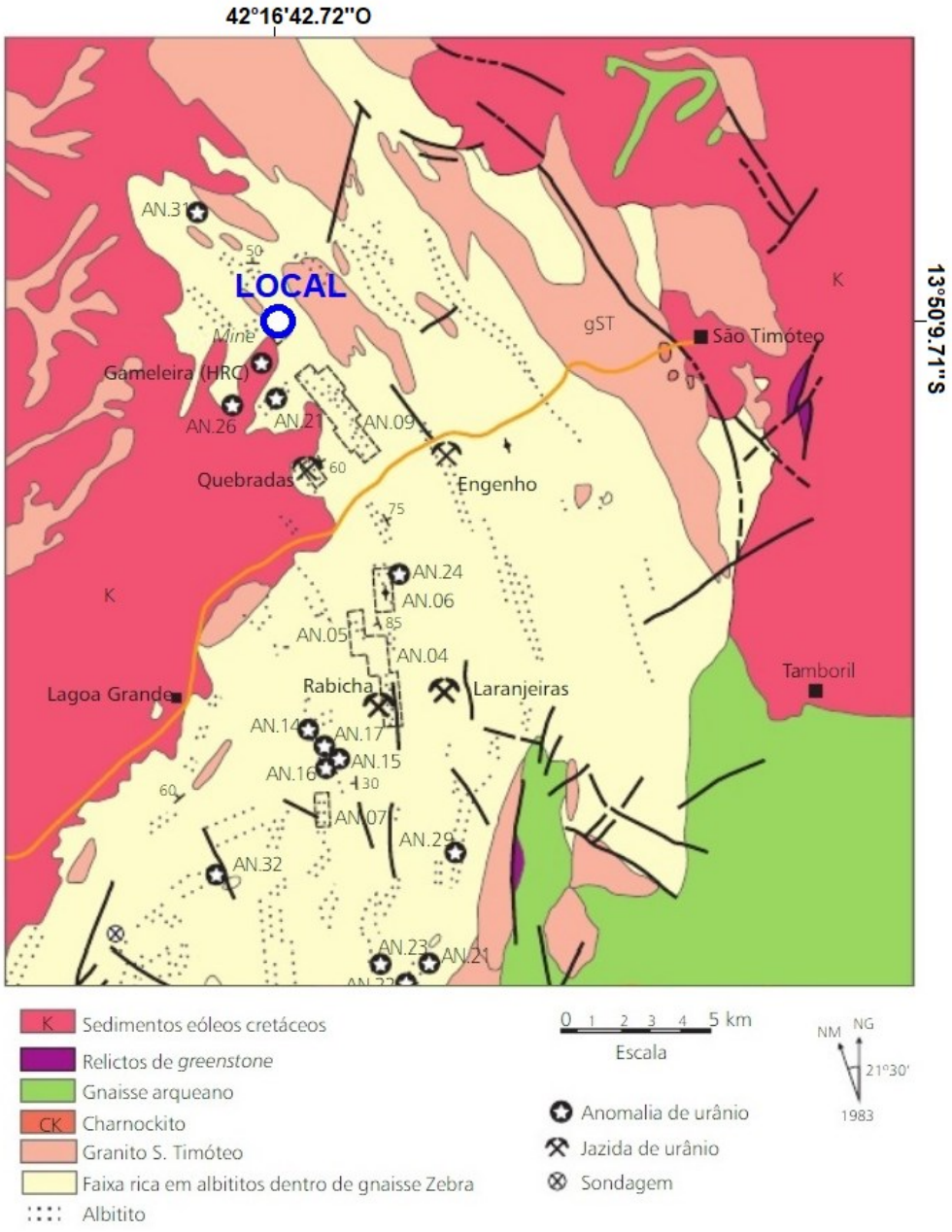
Figura 86 – Localização da área de mineração investigada



Fonte: O autor.

A geologia da região onde se encontra esta área investigada é representada por migmatitos, granitos, gnaisses e albititos (Figura 87), parcialmente recobertos por solos residuais ou sedimentos pouco transportados (PIRES, 2013).

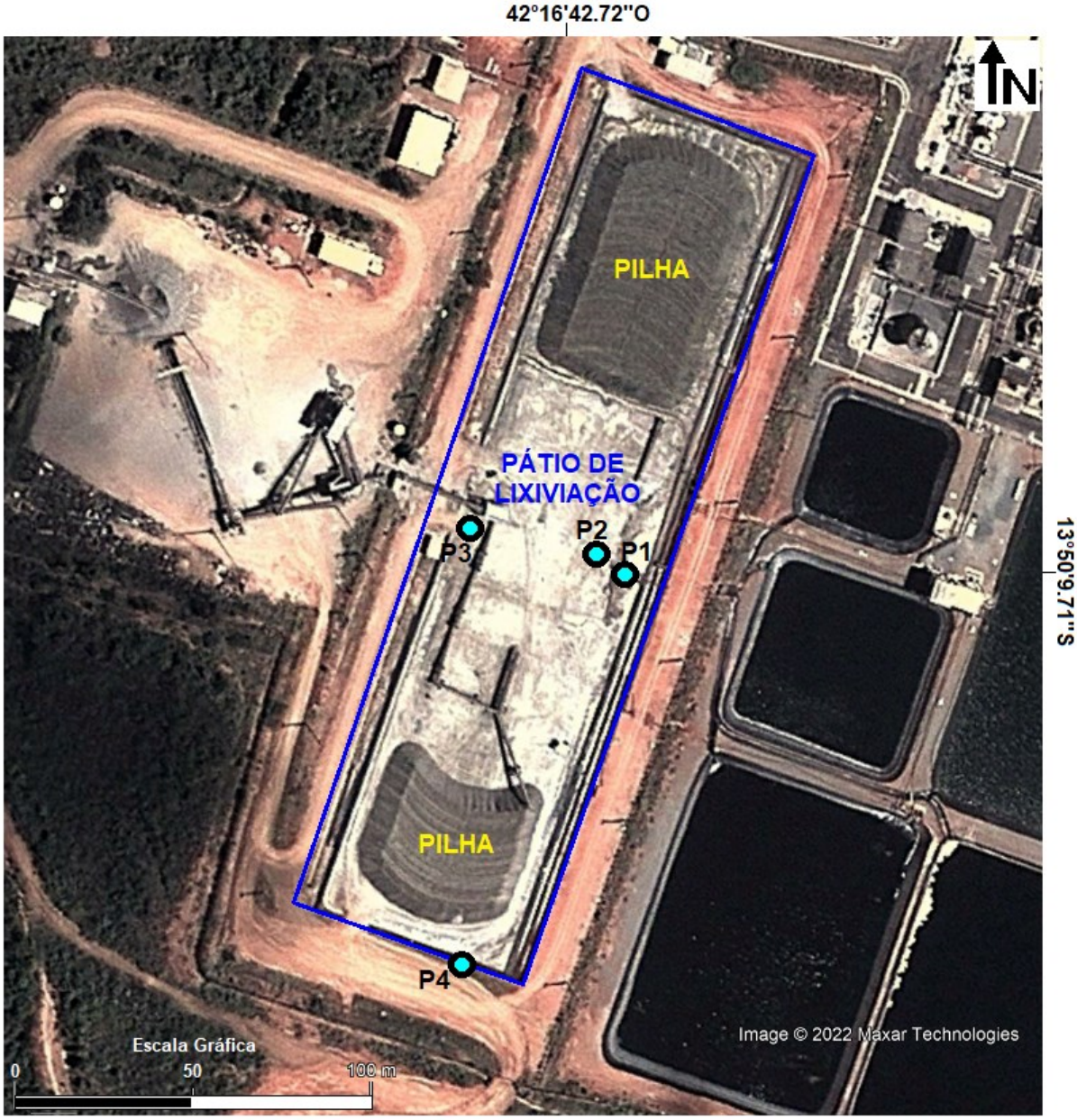
Figura 87 – Geologia da área de estudo da mineração.



Fonte: Adaptado de Pires, 2013.

O topo da zona saturada é variável entre 7,5 e 10,0 m de profundidade de acordo com medições do nível d´água efetuadas em poços de monitoramentos existentes (Figura 88) e sentido do fluxo subterrâneo de noroeste para sudeste.

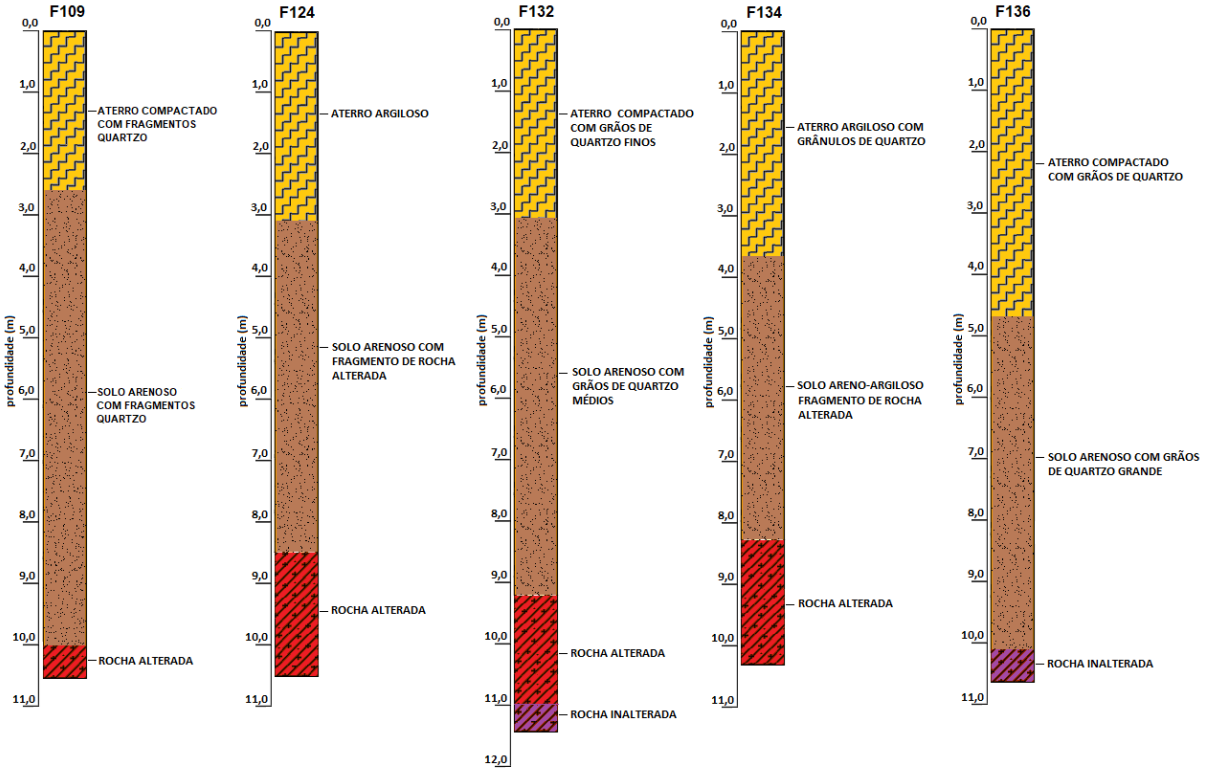
Figura 88 – Área de beneficiamento mineral investigada.



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2022.

Descrições geológicas a partir de sondagens executadas localmente apontam a presença de aterro mais superficial entre 3,0 e 4,0 m de espessura, solo arenoso com fragmentos de quartzo sotoposto, rocha alterada abaixo de 8,5 m de profundidade e rocha inalterada nos níveis mais profundos superiores a 10,0 m (Figura 89).

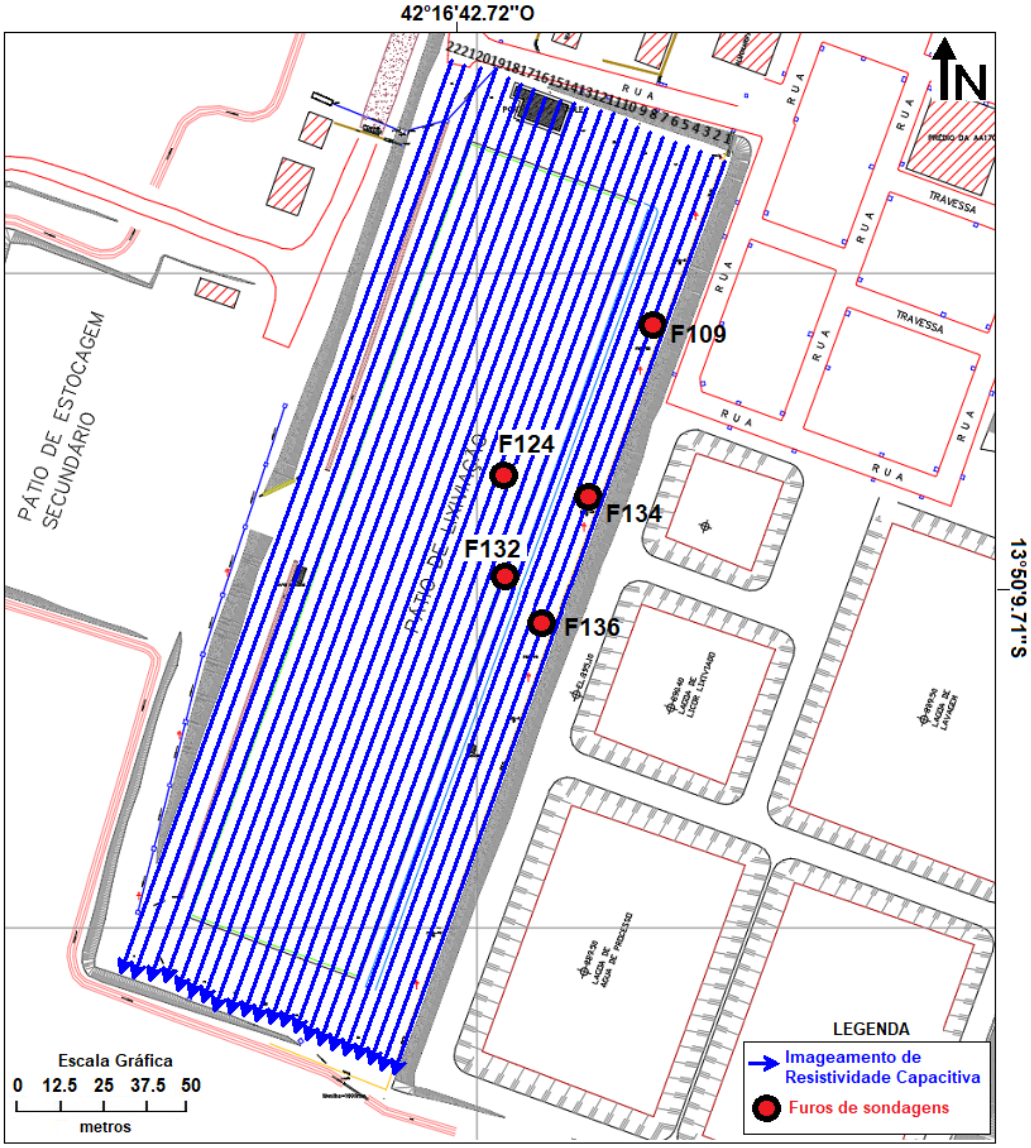
Figura 89 - Descrições de sondagens executadas na área de lixiviação.



Fonte: Adaptado de R&D Mineração e Construção, 2017.

Assim, com o objetivo principal de detecção de eventuais anomalias geofísicas de baixa resistividade elétrica que pudessem indicar os focos principais em subsuperfície de líquidos lixiviados, foram realizados no local da pesquisa 22 perfis paralelos de Resistividade Capacitiva, no sentido de nordeste para sudoeste, com aproximadamente 300,0 m de extensão cada, equidistantes em média de 4,5 m (Figura 90).

Figura 90 - Localização dos perfis capacitivos e sondagens na área.



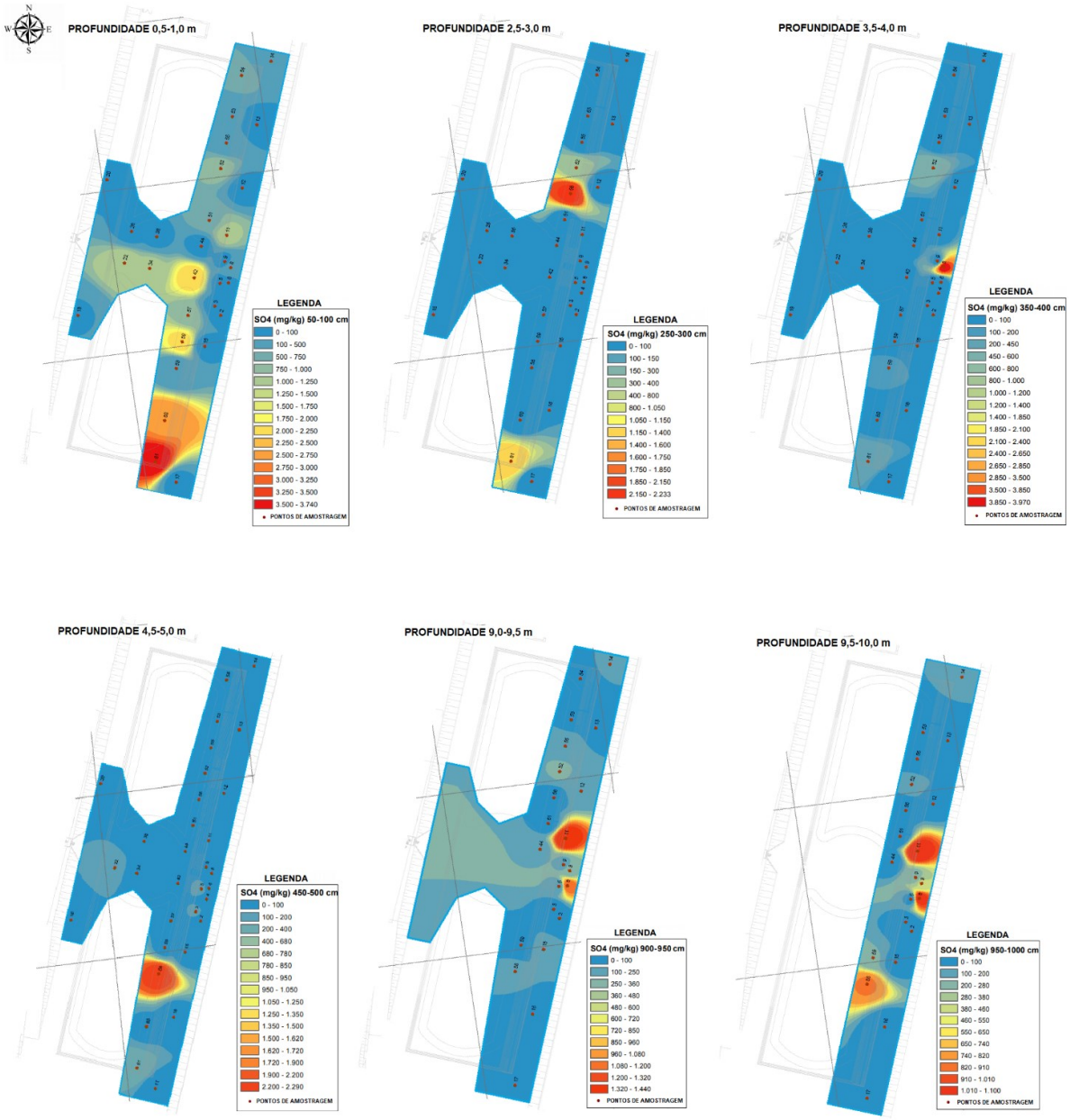
Fonte: Autoria própria.

Na área em questão, foram executadas sondagens com amostragens de solo em diferentes níveis de profundidades para análises dos parâmetros sulfato e urânio natural (COAMB, 2018).

Os resultados analíticos ou de contagens obtidos estão aqui expressos na forma de mapas de isovalores, com faixas de profundidade selecionadas para apresentação de acordo às maiores intensidades dos parâmetros avaliados, como pode ser observado nas figuras a seguir (Figuras 91 e 92).

Neste caso, as faixas de profundidade apresentadas nos mapas da Figura 91 para as amostras compostas de solo para sulfato (em mg/kg) foram de 0,5 a 1,0 m; 2,5 a 3,0 m; 3,5 a 4,0 m; 4,5 a 5,0 m; 9,0 a 9,5 m e 9,5 a 10,0 m.

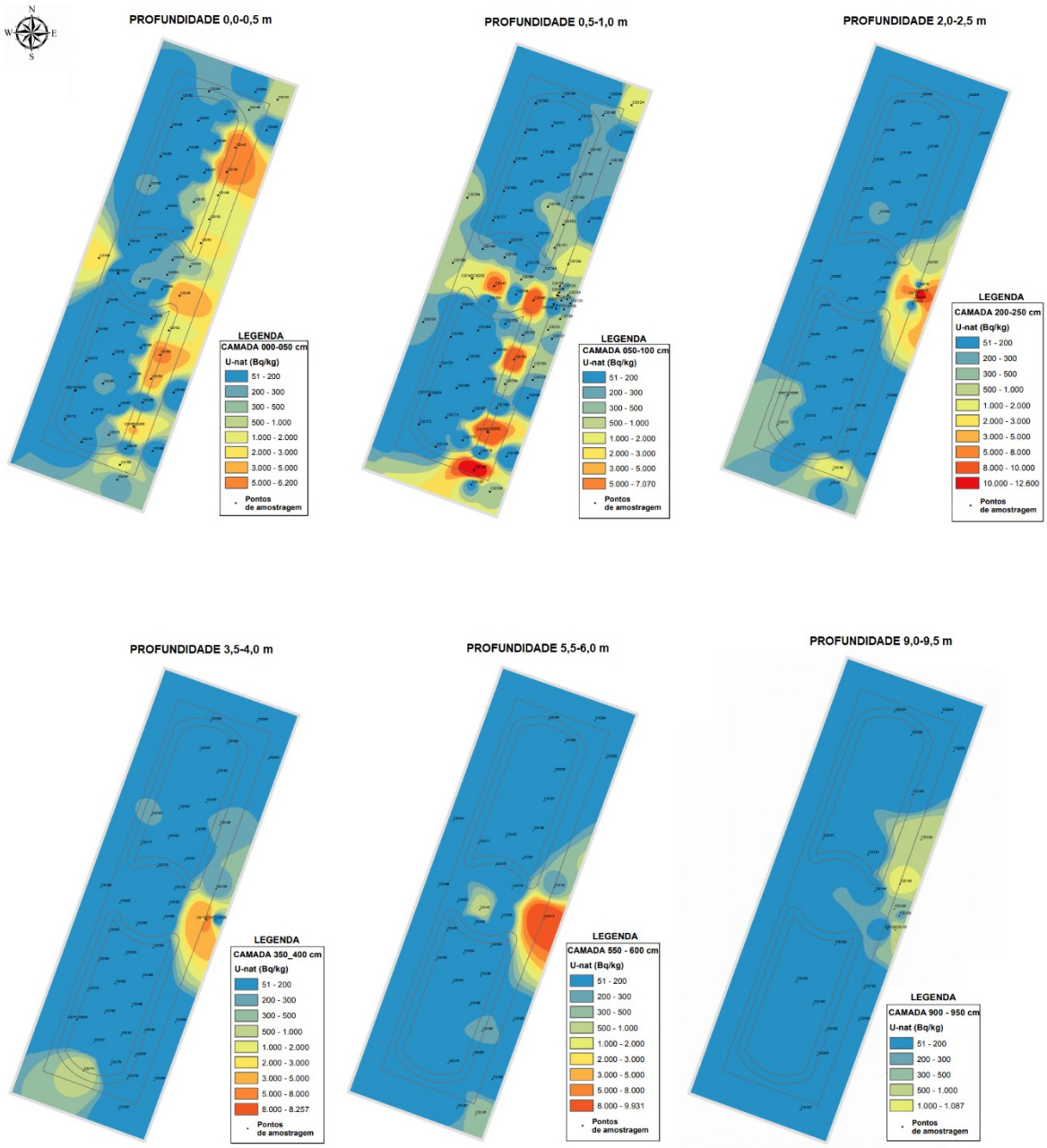
Figura 91 – Concentrações de sulfato (mg/kg) em diferentes profundidades.



Fonte: Coamb, 2018.

Quanto às profundidades avaliadas para o urânio natural, cuja unidade de medida de atividade é Becquerel por quilograma (Bq/kg), os intervalos foram de 0 a 0,5 m; 0,5 a 1,0 m; 2,0 a 2,5 m; 3,5 a 4,0 m; 5,5 a 6,0 m e 9,0 a 9,5 m e são apresentados nos mapas da Figura 92.

Figura 92 - Medidas de urânio natural (Bq/kg) em diferentes profundidades.



Fonte: Coamb, 2018.

Nos mapas de isovalores anteriores, são verificadas variações marcantes nos posicionamentos e profundidades das maiores concentrações de sulfato (SO_4^-) e urânio natural (U-nat) no solo e que revelam que as características geológicas heterogêneas do ambiente favoreceram a migração a partir da superfície e o acúmulo dos lixiviados em locais específicos, cujas dispersões podem ser decorrentes também de fontes de contaminação móveis ou difusas.

A partir dos resultados expressos nos mapas de isovalores das Figuras 91 e 92, foi elaborada a Tabela 11, onde constam, de forma compilada, as maiores concentrações para o sulfato e contagens para o urânio natural nas diferentes faixas de profundidades consideradas nesses mapas.

Tabela 11 - Valores máximos para sulfato e urânio.

Parâmetro analisado	Faixa de profundidade	Concentração máxima (mg/kg)	Parâmetro analisado	Faixa de profundidade	Contagem máxima (Bq/kg)
sulfato	0,5 a 1,0 m	3.500 – 3.740	**urânio natural**	0 a 0,5 m	5.000 – 6.200
sulfato	2,5 a 3,0 m	2.150 – 2.233	**urânio natural**	0,5 a 1,0 m	5.000 – 7.070
sulfato	3,5 a 4,0 m	3.850 – 3.970	**urânio natural**	2,0 a 2,5 m	10.000 – 12.600
sulfato	4,5 a 5,0 m	2.200 – 2.290	**urânio natural**	3,5 a 4,0 m	8.000 – 8.257
sulfato	9,0 a 9,5m	1.320 – 1.440	**urânio natural**	5,5 a 6,0 m	8.000 – 9.931
sulfato	9,5 a 10,0 m	1.010 – 1.100	**urânio natural**	9,0 a 9,5 m	1.000 – 1.087

Fonte: Autoria própria.

Quanto aos valores indicativos dos parâmetros em questão, é nítido na Tabela 11 que, tanto para a concentração do sulfato, como para as contagens do urânio natural, as maiores intensidades ocorrem até a faixa de profundidades entre 5,0 e 6,0 m, pela presumível maior retenção por argilominerais de elevada capacidade de troca catiônica neste nível, e com redução considerável de teores no topo da zona saturada, entre 9,0 e 10,0 m.

Referente à aquisição de dados, esta foi realizada com o equipamento *Ohmmapper TR1* (Figura 93) através de disparo do sinal em tempo a cada 2,0 Hz, com três perfis distintos para cada linha de levantamento e separação entre as extremidades do dipolo transmissor e receptor de 5,0; 10,0 e 20,0 m (comprimento das “cordas”), com distâncias entre os centros dos dipolos de 10,0, 15,0 e 25,0 m portanto.

Figura 93 - Imageamento capacitivo na área de beneficiamento de minério.



Fonte: O autor.

Deste modo, tomado como referência o comprimento de 5,0 m do dipolo transmissor (ou do receptor) e as dimensões das cordas indicadas anteriormente de 5,0; 10,0 e 20,0 m, a sequência estabelecida da fração binária do fator *n* para o levantamento em questão é 1,0; 2,0 e 4,0, que obedece aos pressupostos teóricos de aquisição de dados e que garantiria uma resolução adequada das feições de subsuperfície obtidas neste ensaio, com a menor unidade de interpolação de dados é de 5,0 m.

- 4.6.1. Seções de imageamento de Resistividade Capacitiva

Na sequência nas Figuras 94 a 115, são apresentadas as seções de resistividade elétrica geradas pela inversão de dados no programa Res2Dinv, versão 3.54 (LOKE, 2004), onde a menor unidade de espaçamento de interpolação de dados

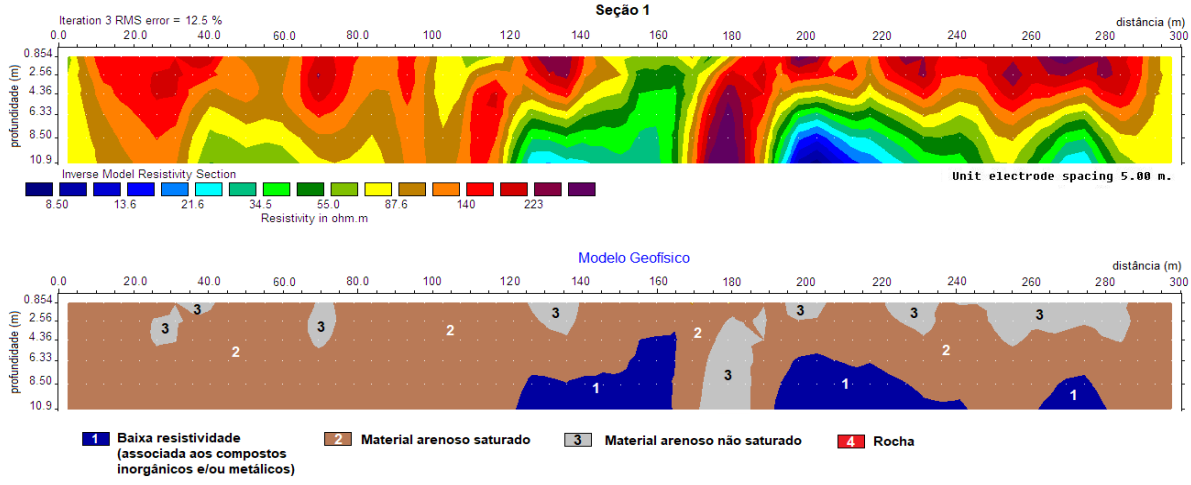
(*smallest unit electrode spacing*) foi de 5,0 m para as separações de 5,0; 10,0 e 20,0 m, bem como seus modelos geofísicos interpretativos.

Nesses modelos geoelétricos, constam a interpretação da litologia local e das feições ambientais observadas, com indicações dos pontos anômalos de baixas resistividades elétricas associados aos eventuais compostos inorgânicos ou de natureza metálica existentes em profundidade decorrente dos processos de lixiviação e infiltração ocorridos.

Além das feições ambientais, os resultados expressam as resistividades elétricas que caracterizam determinados materiais geológicos que estão presentes em subsuperfície, cujos contrastes também podem refletir os diferentes graus de umidade ou saturação ou até mesmo de fraturamento, principalmente nos locais onde existem contatos subverticais nas seções.

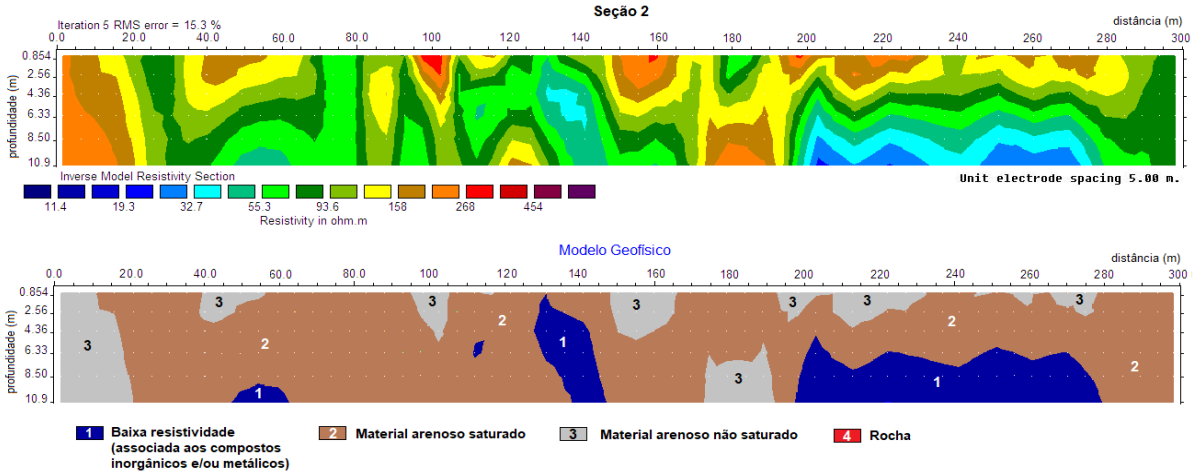
Para melhor compreensão dos resultados obtidos neste ensaio geofísico, é importante o fato que as eventuais substâncias de interesse presentes em subsuperfície, representado pelo sulfato (SO_4^-), derivado do ácido sulfúrico usado na lixiviação dos materiais, e pelo óxido de urânio U_3O_8, que é o minério que ser deseja extrair da rocha, possuem baixas resistividades elétricas. O sulfato pode variar de 2,03 a 25,0 ohm.m de acordo com sua concentração em solução aquosa conforme Trani *et al.* (2011) e para o U_3O_8 o valor será de 0,20 ohm.m, segundo George & Karkhanavala (1963).

Figura 94 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 1.



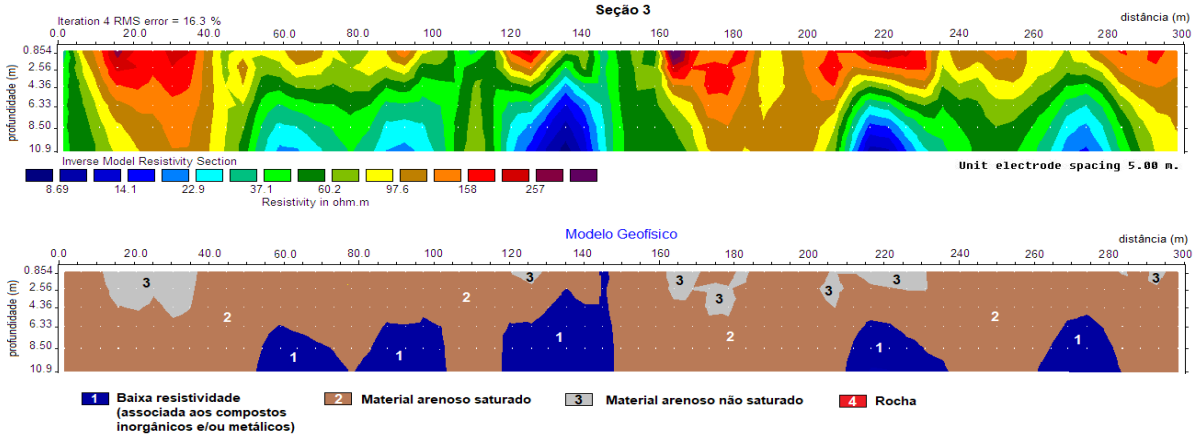
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 95 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 2.



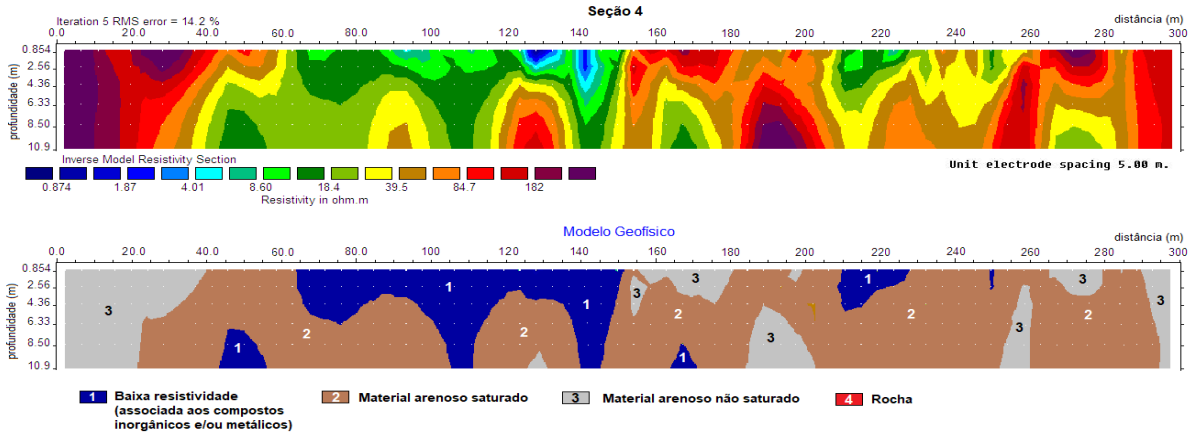
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 96 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 3.



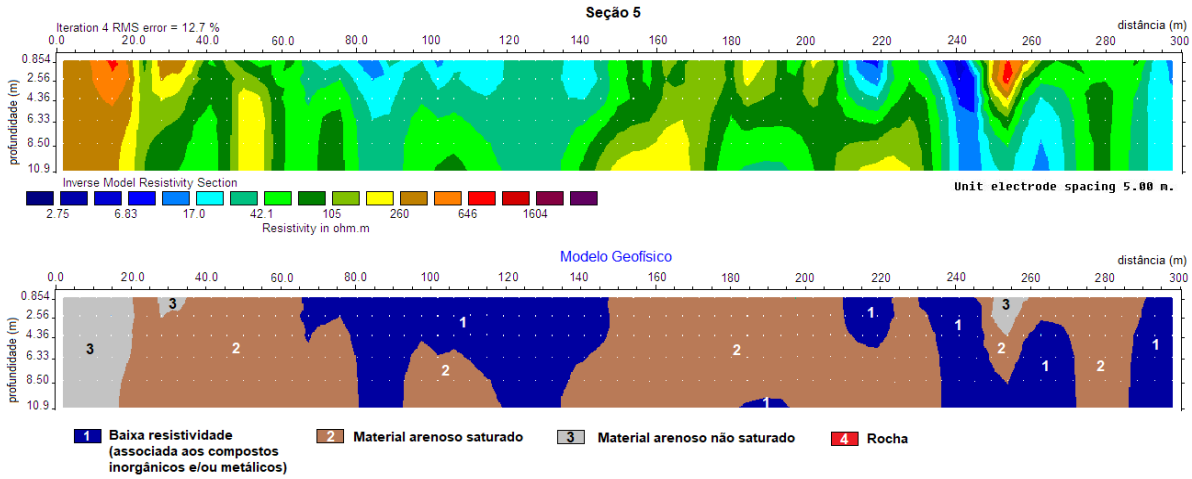
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 97 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 4.



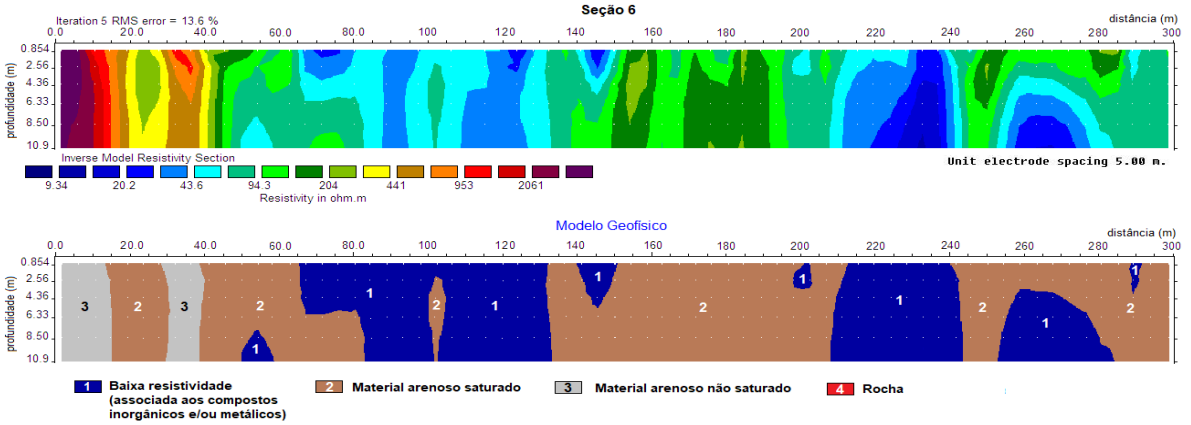
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 98 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 5.



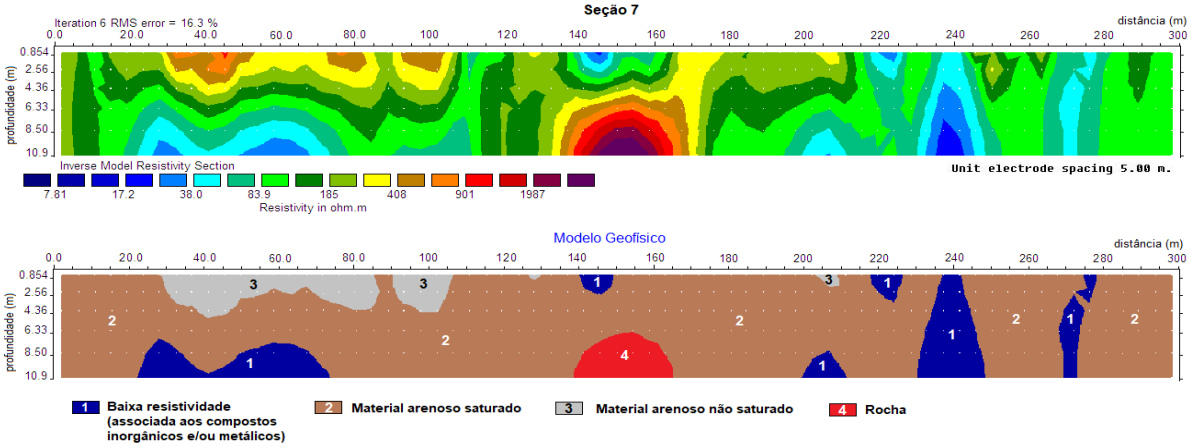
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 99 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 6.



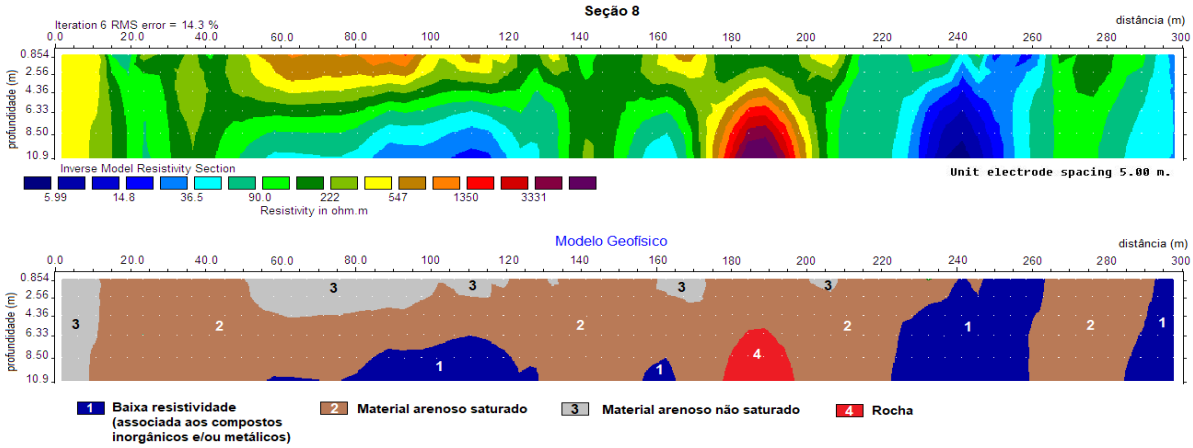
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 100 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 7.



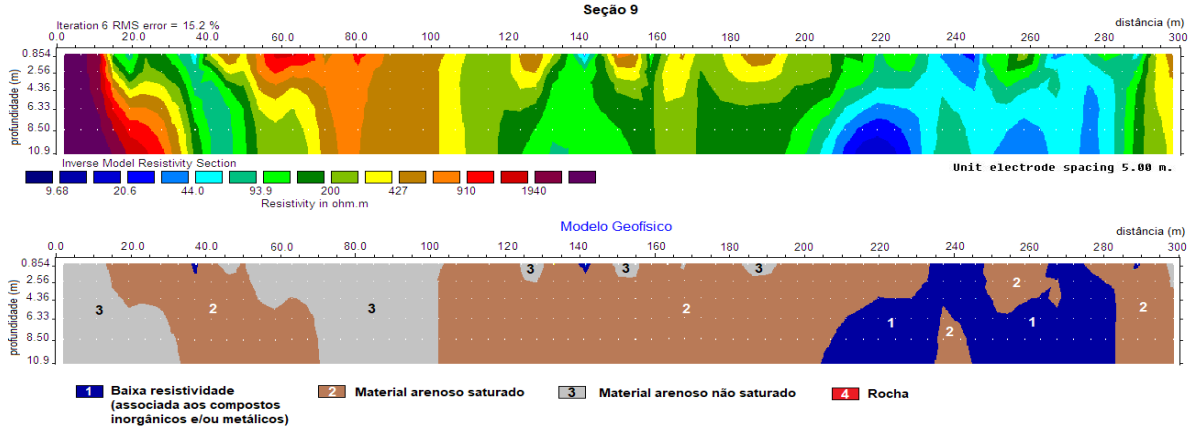
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 101 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 8.



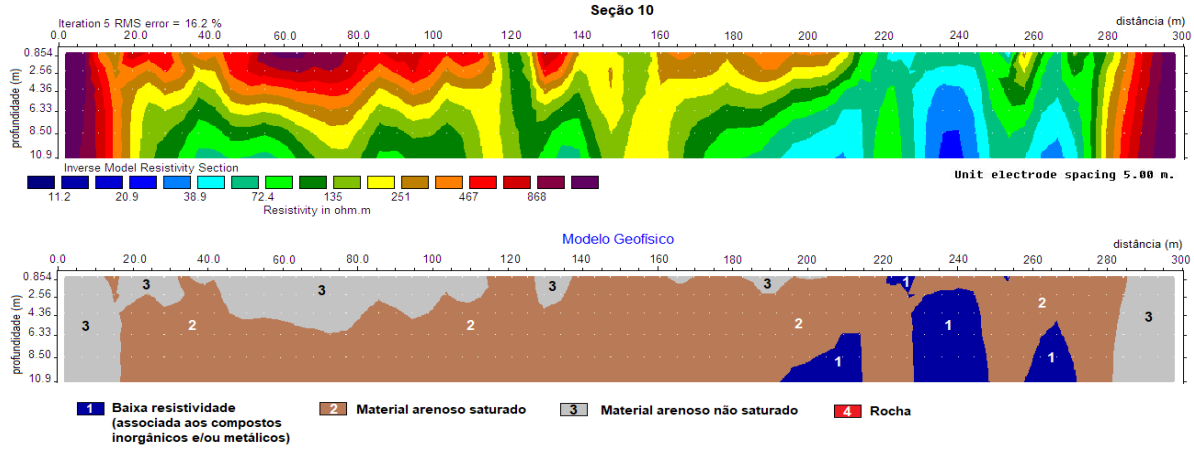
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 102 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 9.



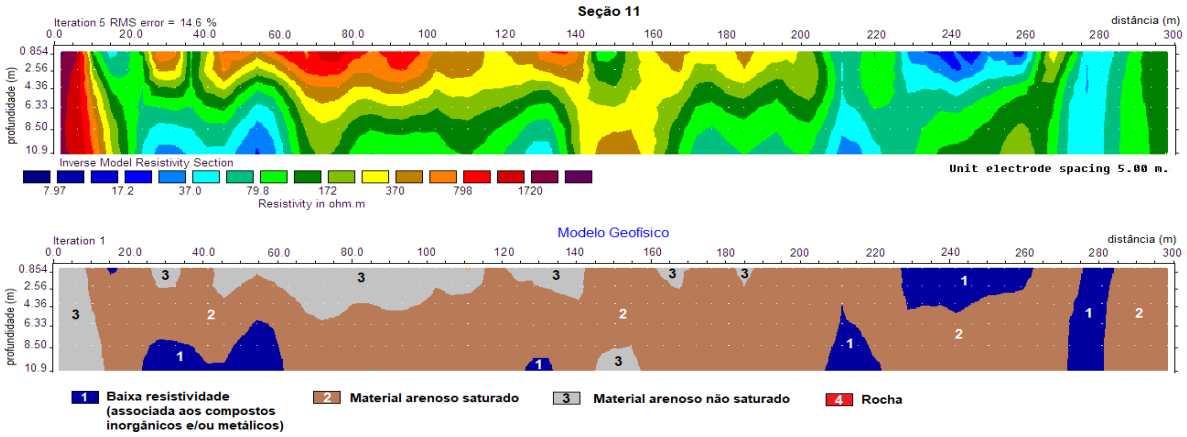
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 103 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 10.



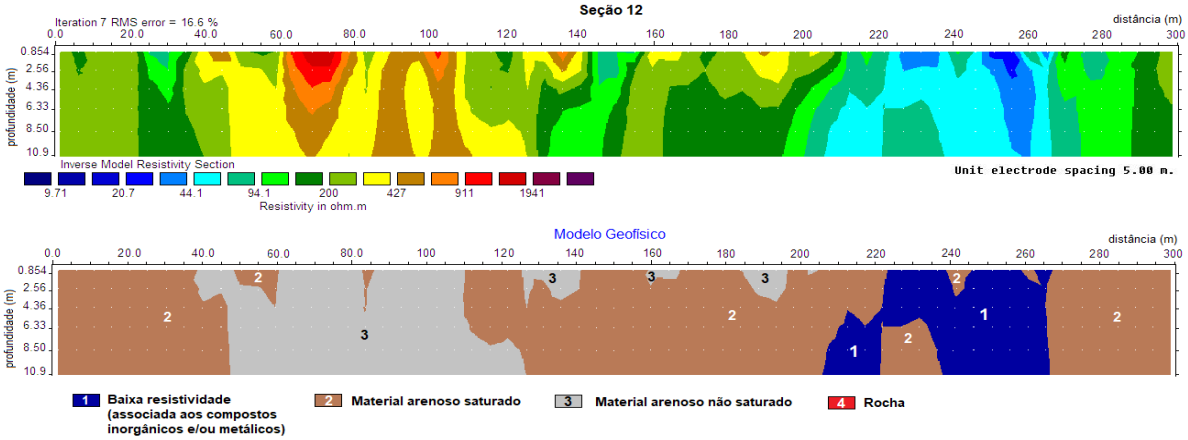
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 104 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 11.



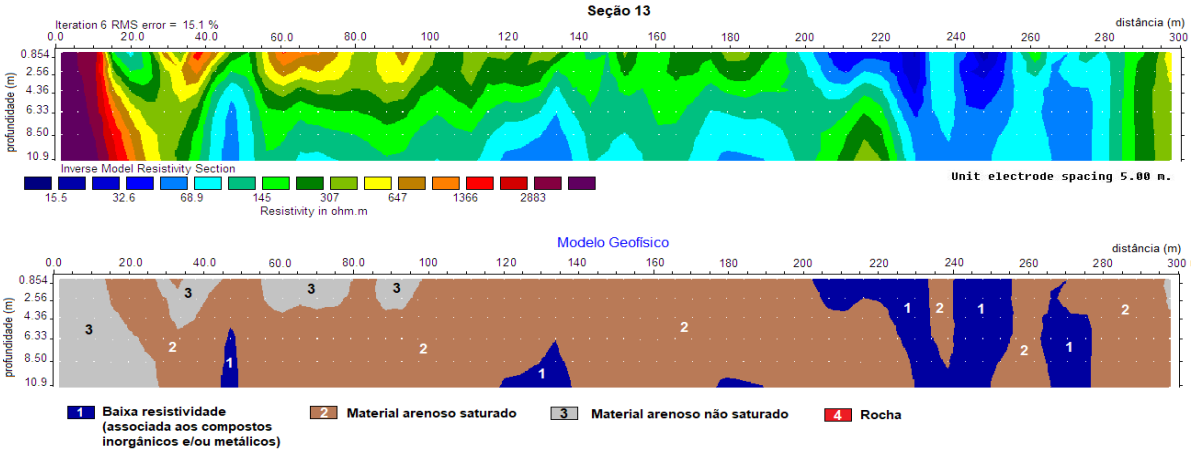
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 105 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 12.



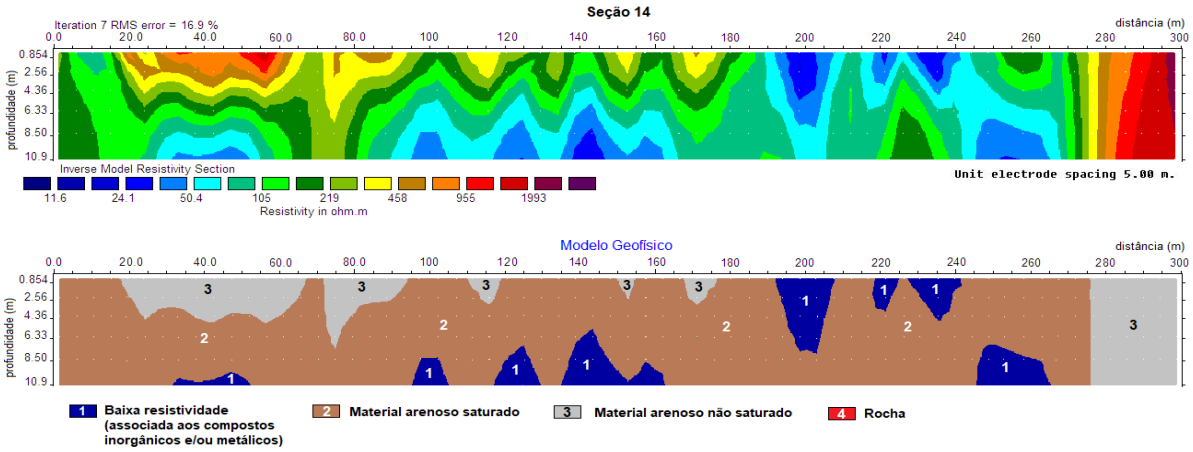
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 106 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 13.



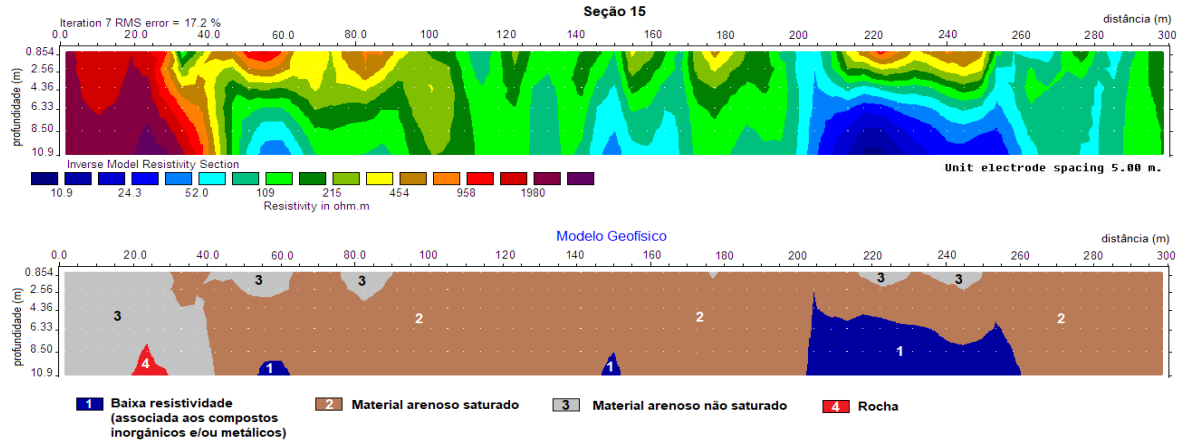
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 107 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 14.



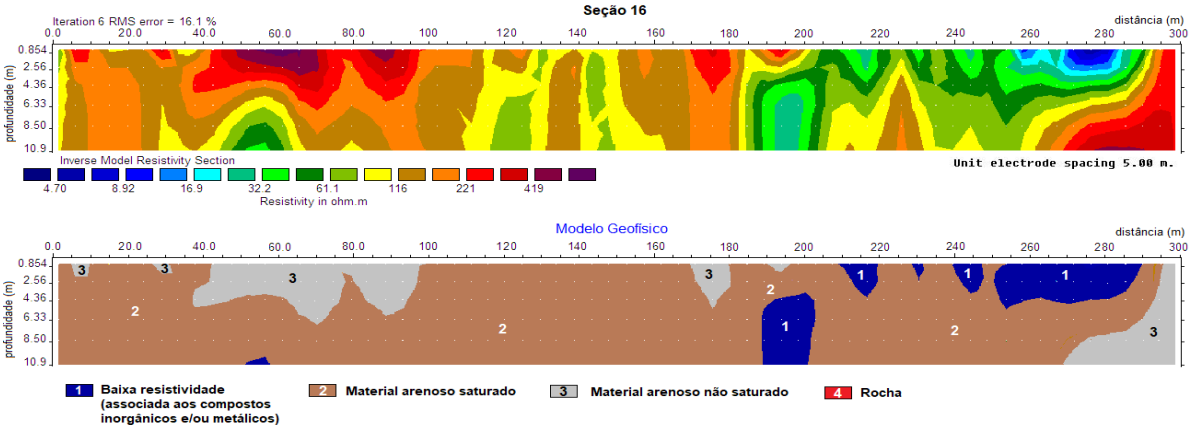
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 108 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 15.



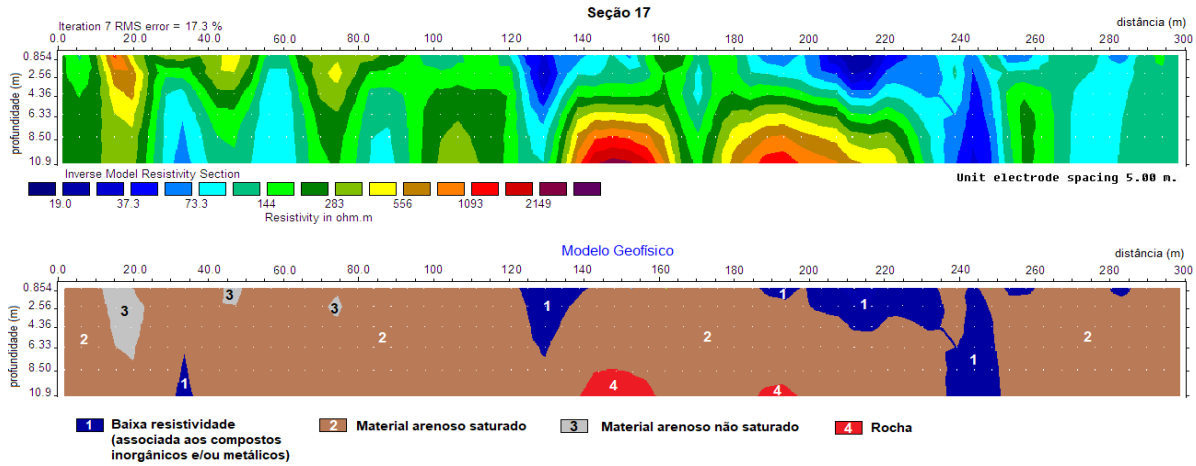
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 109 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 16.



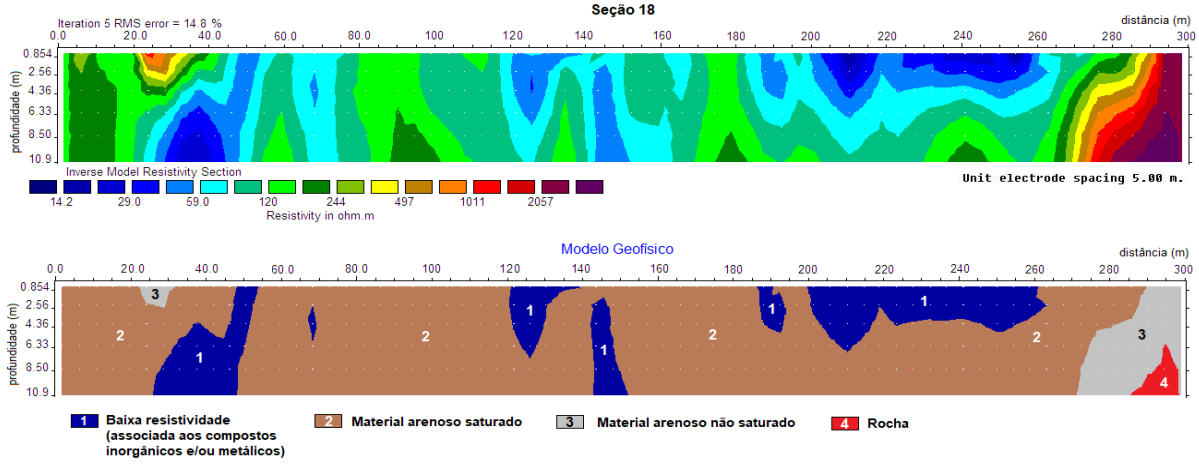
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 110 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 17.



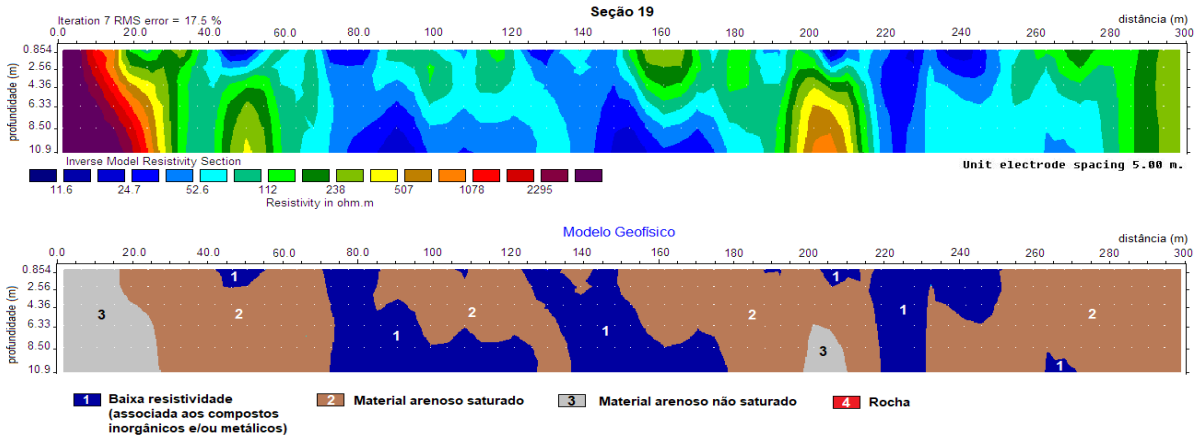
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 111 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 18.



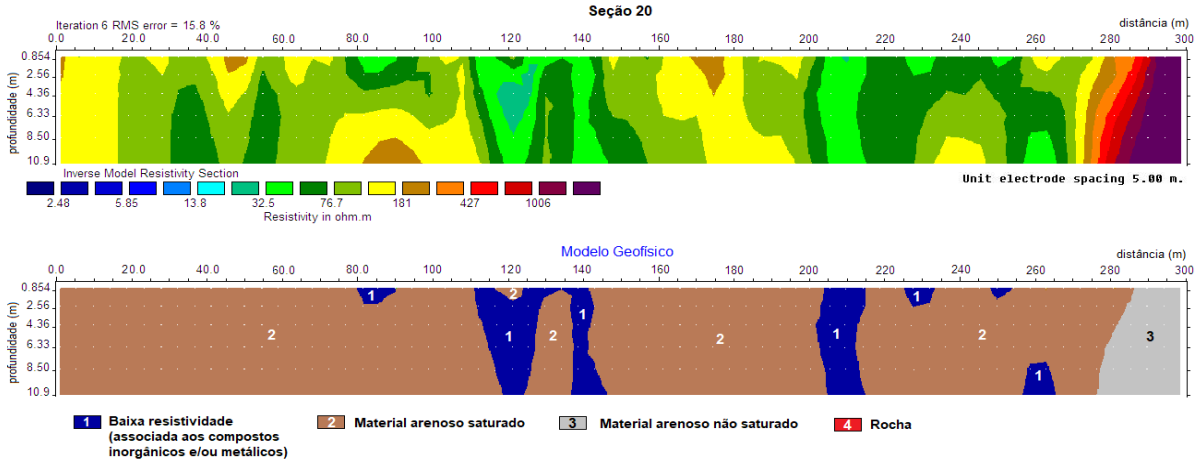
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 112 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 19.



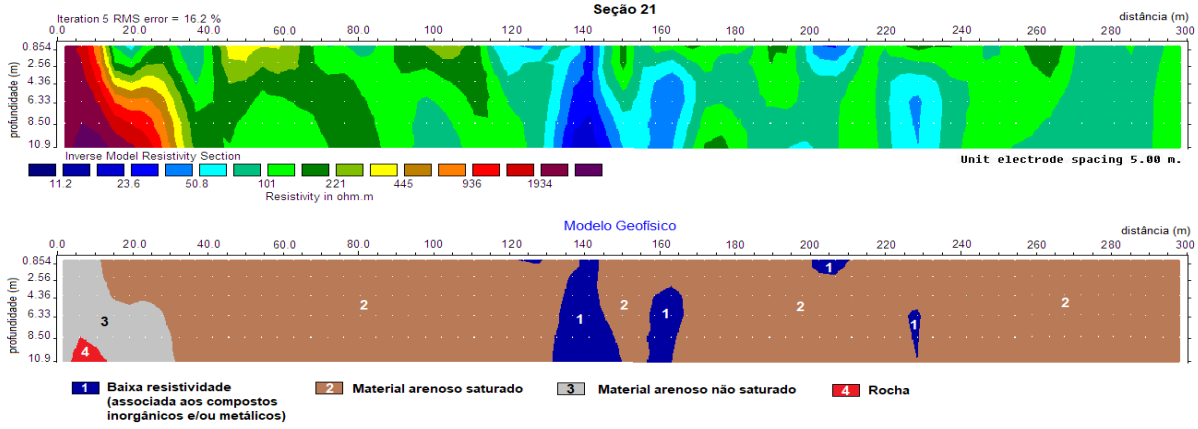
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 113 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 20.



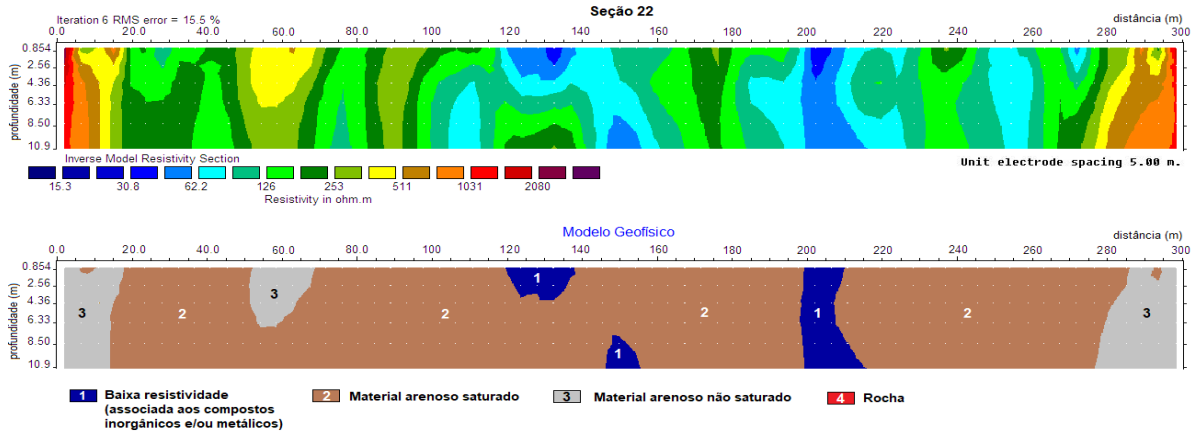
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 114 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 21.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 115 - Seção de resistividade e modelo de inversão da Linha 22.



Fonte: Dados da pesquisa.

De modo geral, baseado nas variações de resistividade elétrica verificadas nas imagens anteriores, devem existir compartimentos geológicos com propriedades físicas diferentes entre si, apontando a heterogeneidade dos materiais na área investigada, decorrentes, provavelmente, de diferenças litológicas, de granulometria, de graus de saturação, decomposição e fraturamento, e, consequentemente, de dureza dos materiais, além de refletirem diferenças de concentração das eventuais substâncias inorgânicas e/ou metálicas existentes em subsuperfície.

Apenas como observação, alguns contatos verticais nas imagens anteriores, principalmente no início e fim das seções onde existem menos dados de resistividade elétrica, podem ter sido gerados pela própria interpolação e devem ser considerados com essa ressalva.

Verificou-se a existência de cinco grupos principais de feições subterrâneas, naturais ou não, de estruturas descontínuas e irregulares, interpretadas de acordo com suas faixas de variação de resistividade elétrica, posicionamentos e conformações como:

1) Zonas de baixa resistividade elétrica: anomalias de menores valores e relacionadas às presenças prováveis de compostos inorgânicos e/ou metálicos em maiores concentrações em subsuperfície.
2) Material arenoso saturado: região com valores intermediários de resistividade elétrica com influência da lixiviação de líquidos da área de beneficiamento e cujas variações laterais devem expressar os diferentes graus de saturação e as existências de fraturamentos que podem propiciar caminhos preferenciais de fluxo vertical;
3) Material arenoso não saturado: porções com altos valores de resistividade elétrica sem a influência dos lixiviados relacionadas aos materiais de aterramento ou aos solos arenosos naturalmente mais secos;
4) Rocha: zonas de altas resistividades elétricas associadas aos materiais rochosos alterados ou inalterados e localizados nos níveis mais profundos das seções.

Desta maneira, a avaliação das variações de valores de resistividade elétrica a partir dos modelos geofísicos anteriores permitiu a elaboração da Tabela 12, onde constam a identificação das feições ambientais e geológicas e as faixas de valores consideradas em suas determinações.

Tabela 12 - Resistividades das feições interpretadas do pátio de lixiviação.

Perfil	Anomalia de baixa resistividade (ohm.m)	Material arenoso saturado (ohm.m)	Material arenoso não saturado (ohm.m)	Rocha (ohm.m)
Seção 1	< 44,7	44,7 a 181,5	> 181,5	-
Seção 2	< 55,3	55,3 a 158,0	> 158,0	-
Seção 3	< 48,6	48,6 a 158,0	> 158,0	-
Seção 4	< 18,4	18,4 a 133,3	> 133,3	-
Seção 5	< 42,1	42,1 a 260,0	> 260,0	-
Seção 6	< 68,9	68,9 a 322,5	> 322,5	-
Seção 7	< 60,9	60,9 a 296,5	296,5 a 901,0	> 901,0
Seção 8	< 63,2	63,2 a 384,5	384,5 a 1350,0	> 1350,0
Seção 9	< 68,9	68,9 a 427,0	> 427,0	-
Seção 10	< 55,6	55,6 a 359,0	> 359,0	-
Seção 11	< 58,4	58,4 a 370,0	> 370,0	-
Seção 12	< 69,1	69,1 a 313,5	> 313,5	-
Seção 13	< 68,9	68,9 a 477,0	> 477,0	-
Seção 14	< 50,4	50,4 a 338,5	> 338,5	-
Seção 15	< 52,0	52,0 a 454,0	454,0 a 2491,0	> 2491,0
Seção 16	< 46,6	46,6 a 221,0	> 221,0	-
Seção 17	< 73,3	73,3 a 419,5	419,5 a 1093,0	> 1093,0
Seção 18	< 59,0	59,0 a 497,0	497,0 a 2580,0	> 2580,0
Seção 19	< 52,6	52,6 a 507,0	> 507,0	-
Seção 20	< 54,6	54,6 a 427,0	> 427,0	-
Seção 21	< 50,8	50,8 a 445,0	445,0 a 2433,0	> 2433,0
Seção 22	< 62,2	62,2 a 382,0	> 382,0	-

Fonte: Dados da pesquisa.

De maneira geral, essa provável heterogeneidade dos materiais geológicos presentes, indicadas pelas medidas de resistividade elétrica, pode influenciar as condições hidrogeológicas locais, com possível existência de zonas com maior ou menor porosidade, com diferenças de permeabilidade hidráulica ou com graus distintos de fraturamento.

Portanto, tais situações heterogêneas podem contribuir com a variação nos sentidos de propagação da água subterrânea pela presença de caminhos preferenciais em profundidade, como também de discrepâncias nas velocidades de migração dos possíveis contaminantes em subsuperfície e dos seus tempos de retenção no ambiente.

Quanto às zonas anômalas de baixas resistividade elétricas verificadas nas seções, estas indicam que os compostos inorgânicos ou metálicos em profundidade se distribuem de forma difusa na área investigada, ou seja, com diversos pontos esparsos de maiores concentrações.

Este espalhamento observado nos resultados é condizente, também, com a forma que as atividades foram desenvolvidas no local por meio da lixiviação dos materiais dispostos em superfície e pela variação das dimensões das pilhas de minério ao longo do tempo, as quais constituem as fontes primárias de contaminação neste caso, e como pode ser visualizado no mosaico da Figura 116.

Figura 116 – Variação das dimensões das pilhas de rejeito.



Fonte: Modificado do Google Earth, 2022.

- 4.6.2. Mapas de resistividade elétrica em corte de profundidade

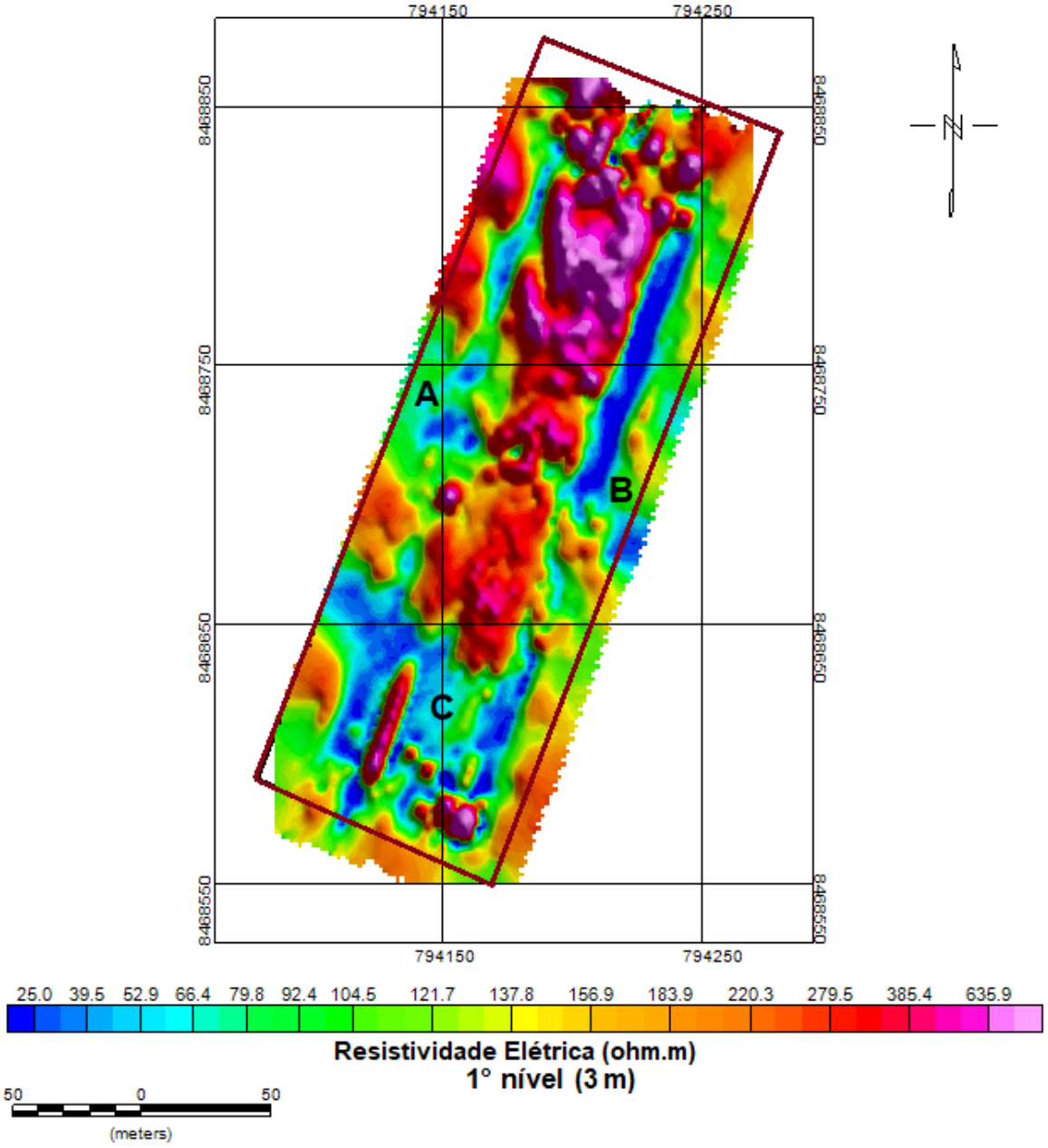
Em função da variedade de linhas de imageamento elétrico executados no local em estudo, da equidistância entre essas linhas e dos comprimentos aproximadamente iguais (300 metros), foi possível integrar e interpolar os dados de resistividade elétrica dos perfis paralelos por meio da utilização do programa Oasis-Montaj, versão 6.4 (GEOSOFT, 2007), da empresa Geosoft Incorporated (Canadá), por meio do método de krigagem.

Neste contexto, destaca-se que na elaboração dos mapas de resistividade elétrica em corte de profundidade, também foi testada a interpolação dos dados obtidos pelo método do inverso do quadrado da distância.

Porém, comparativamente, a krigagem forneceu melhores resultados e maior coerência em função da distribuição regular (equidistâncias) dos perfis de amostragem na área e da grande quantidade de leituras adquiridas nas medições de campo.

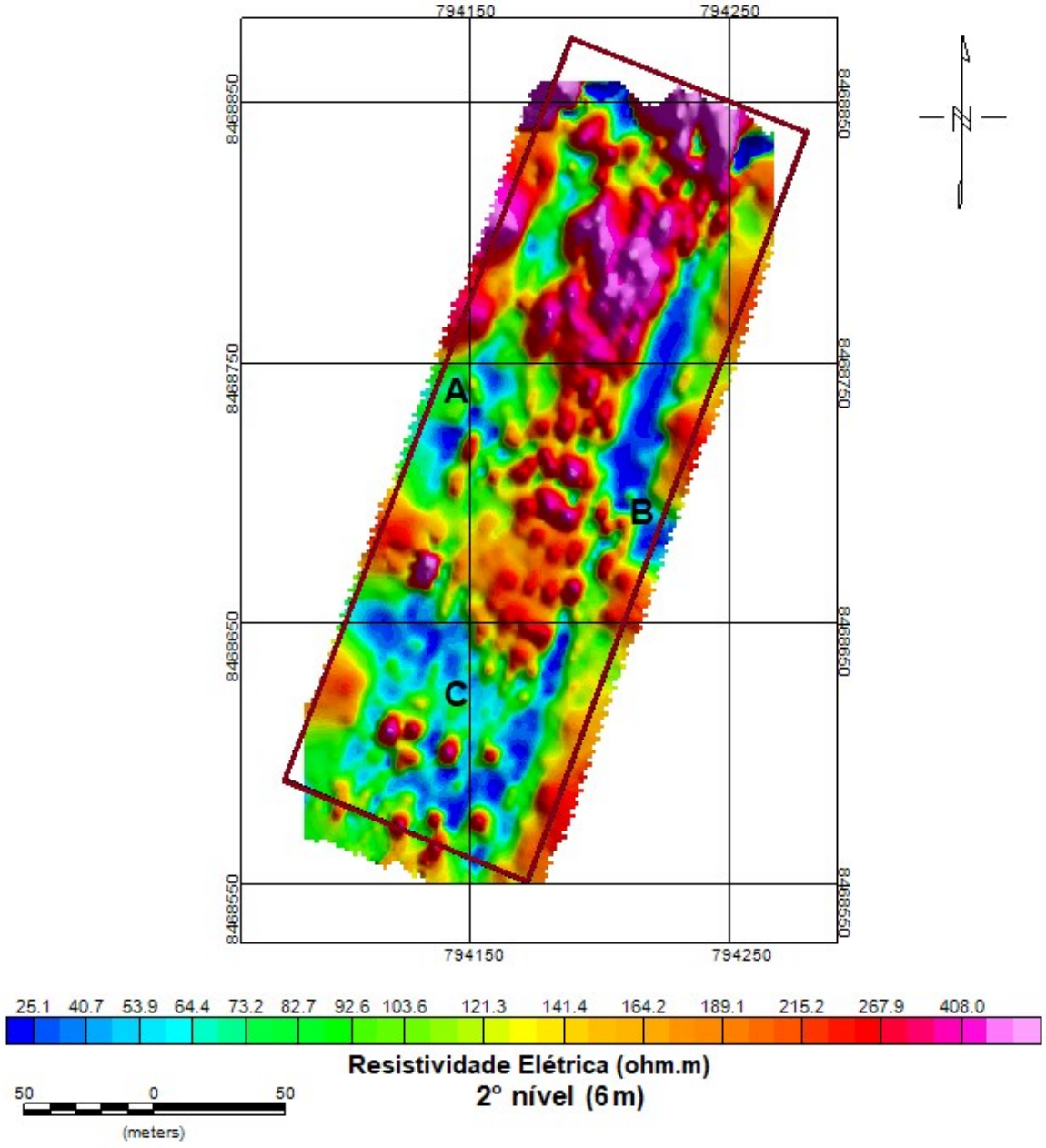
Desta maneira, foram elaborados mapas de corte (*slices*) nas profundidades regulares de 3,0; 6,0 e 9,0 metros, para visualização em planta da distribuição dos valores de resistividades elétricas por toda a área investigada, com especial atenção ao posicionamento das zonas de baixas resistividades associadas aos compostos inorgânicos e/ou metálicos e cujos resultados são observados na sequência nas Figuras 117, 118 e 119.

Figura 117 - Mapa de resistividade capacitiva na profundidade de 3,0 m.



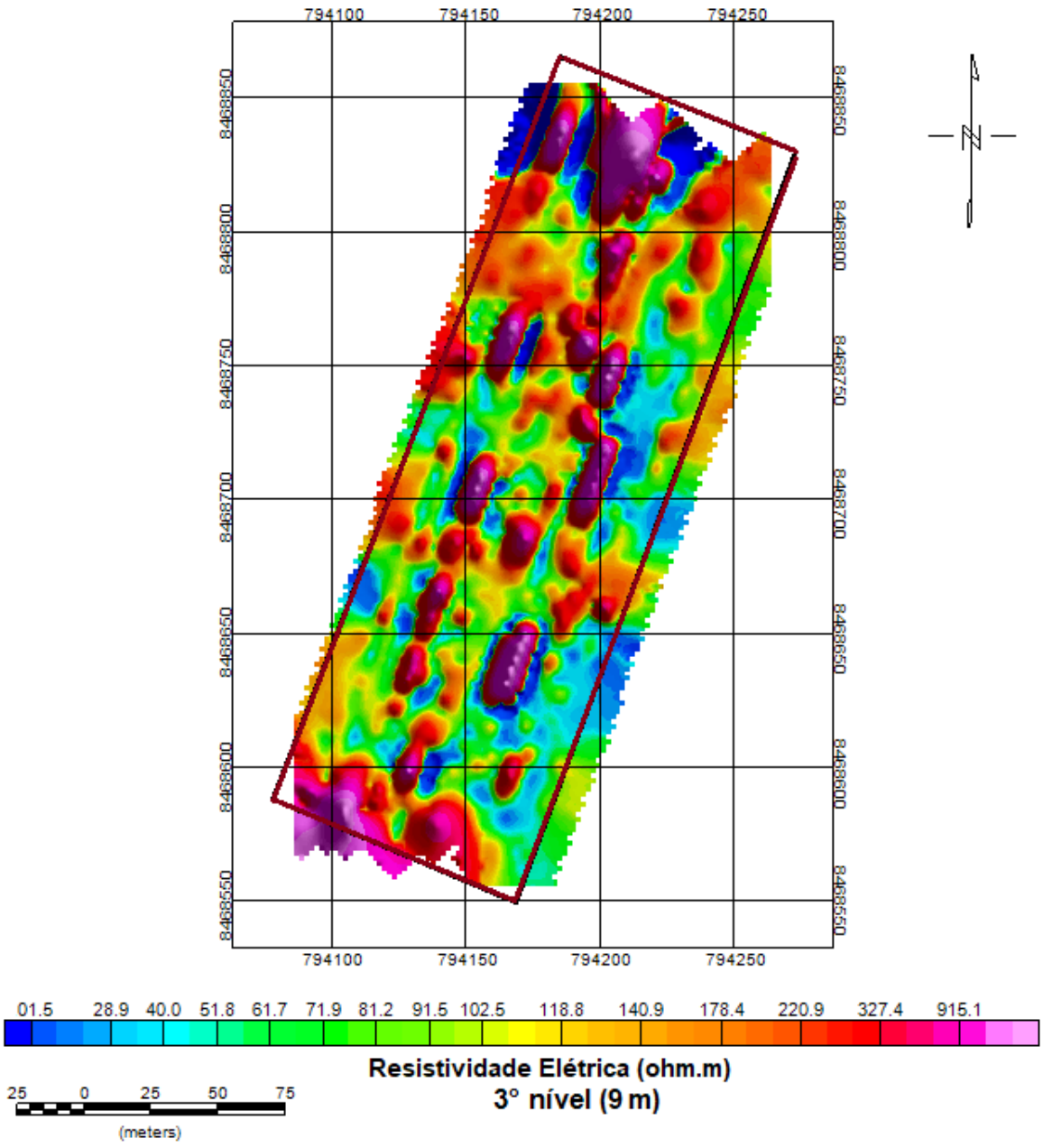
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 118 - Mapa de resistividade capacitiva na profundidade de 6,0 m.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 119 - Mapa de resistividade capacitiva na profundidade de 9,0 m.



Fonte: Dados da pesquisa.

De modo geral, os mapas de anomalias dos imageamentos de Resistividade Capacitiva (Figuras 117, 118 e 119) indicam a existência de regiões de menores resistividades elétricas em diversos pontos dispersos na área em questão e que podem estar associados às presenças de substâncias inorgânicas e/ou metálicas proveniente de possíveis fontes difusas.

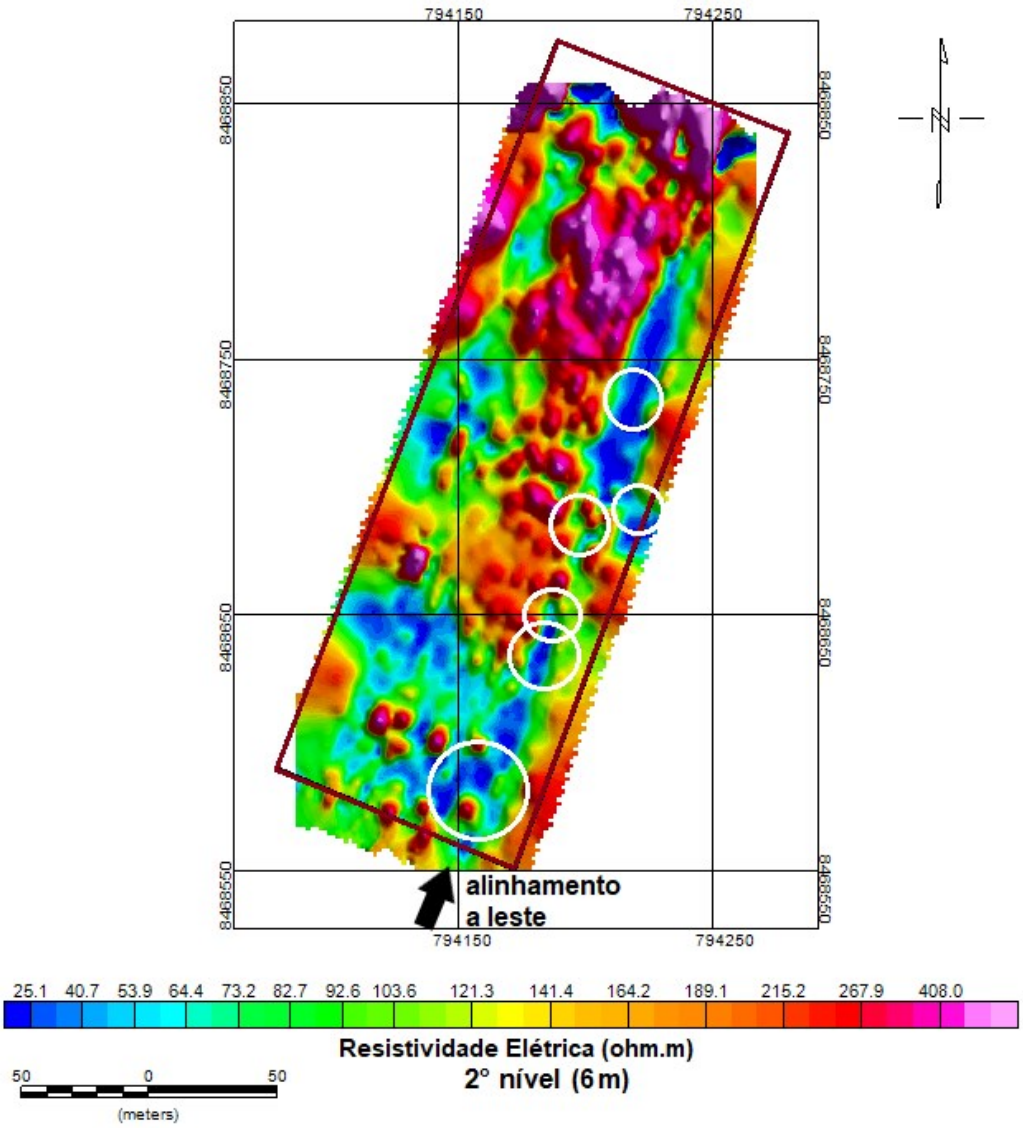
A distribuição das resistividades elétricas nos mapas de nível de corte de profundidade de 3,0 e 6,0 m são bem parecidas e representam o comportamento da resistividade elétrica na zona não saturada, observadas três porções anômalas principais de baixas resistividades e que se repetem nesses dois níveis, as quais foram denominadas de A, B e C (Figuras 117 e 118) e estão posicionadas nas regiões oeste, leste-central e sul, respectivamente.

Nesses mapas de profundidades de investigação de 3,0 e 6,0 m das Figuras 117 e 118, foram detectadas anomalias de baixas resistividades elétricas de formato alongado e longitudinais na região leste-central (porção B), a qual pode estar correlacionada a estruturas geológicas lineares como fraturas contida no solo/saprólito.

Quanto aos resultados do mapa de resistividade capacitiva na profundidade de corte de 9,0 m (Figura 119), são identificadas anomalias de baixa resistividade elétrica com aspectos menos contínuos e mais difusos ainda que as dos mapas anteriores de profundidades mais rasas (Figuras 117 e 118). Este padrão pode indicar a existência de pequenos focos residuais causados pela dissolução e dispersão dos compostos inorgânicos ou metálicos no horizonte saprolítico de solo e sua interface com o nível do aquífero livre.

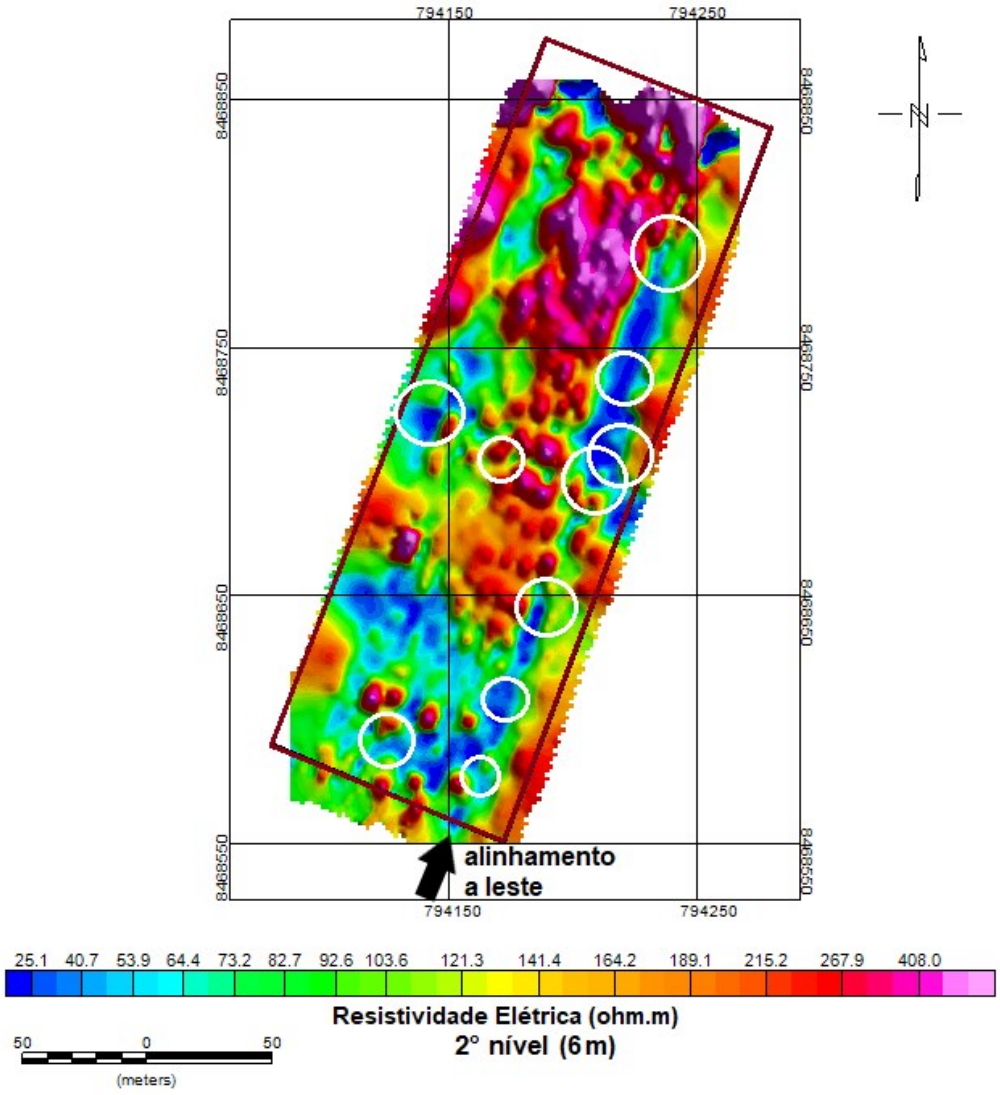
Para ilustração da correlação direta entre os posicionamentos das anomalias de baixa resistividade elétrica obtidas pela Resistividade Capacitiva na profundidade de 6,0 m e os focos principais de sulfato e urânio na zona não saturada, foram elaborados os mapas de justaposição a serem apresentados a seguir nas Figuras 120 e 121, onde os locais de maiores concentrações dos compostos estão representados por círculos brancos de dimensões distintas.

Figura 120 – Focos principais de sulfato e resistividades medidas.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 121 - Focos principais de urânio e resistividades medidas.



Fonte: Dados da pesquisa.

Numa primeira abordagem, é verificada a coincidência de posicionamentos dos focos principais de maiores concentrações de sulfato e urânio natural em relação às anomalias de baixa resistividade elétrica obtidas pela Resistividade Capacitiva, cuja distribuição pela área indica a difusividade nas condições de infiltração e dispersão em virtude das heterogeneidades geológicas existentes em subsuperfície.

Em relação aos focos de maiores concentrações do sulfato, a Figura 120 revela posições nas áreas leste-central e sul concordantes às localizações das zonas anômalas de baixas resistividades elétricas B e C apresentadas nos mapas das Figuras 117 e 118.

Referente ao urânio total, é possível constatar nos mapas da Figura 121 que seus maiores valores são medidos na porção leste, central, sul e oeste, e que também coincidem com as localizações das zonas de baixas de resistividades elétricas A, B e C identificadas nos mapas das Figuras 117 e 118.

Estes mapas mostram um alinhamento predominante nos posicionamentos dos focos de sulfato e do urânio coincidente com a zona de baixa resistividade elétrica que aparece em toda a extensão da área leste do local investigado, que pode ter origem num maior grau de fraturamento do solo nesta região.

Através do cruzamento dos dados geofísicos obtidos e dos posicionamentos do pontos de maiores concentrações dos contaminantes e dos níveis da profundidade da rocha inalterada é plausível que o processo de migração subterrâneo foi iniciado por fonte superficial e seguiu em profundidade por caminhos preferencias como fraturas ou microfissuras verticais no solo, seguido de aporte em zona de fratura linear com início nos 3,0 m de profundidade, confirmado por diversos pontos de anomalias para sulfato e urânio no solo.

Assim, em função da heterogeneidade geológica da área estimada por meio resultados geofísicos, conclui-se que os compostos de interesse se posicionaram em microzonas mais permeáveis ou porosas, o que coincide com a alternância nos posicionamentos e profundidades das maiores concentrações de sulfato e urânio natural apontada pelos dados analíticos.

- 4.6.3. Dados comparativos de resistividade elétrica

Para comparação dos resultados da aplicação da Resistividade Capacitiva na investigação ambiental da área em questão, foram utilizados os dados obtidos no mesmo local por nove perfis longitudinais e paralelos aplicando-se o método de Eletrorresistividade galvânica (Figura 122).

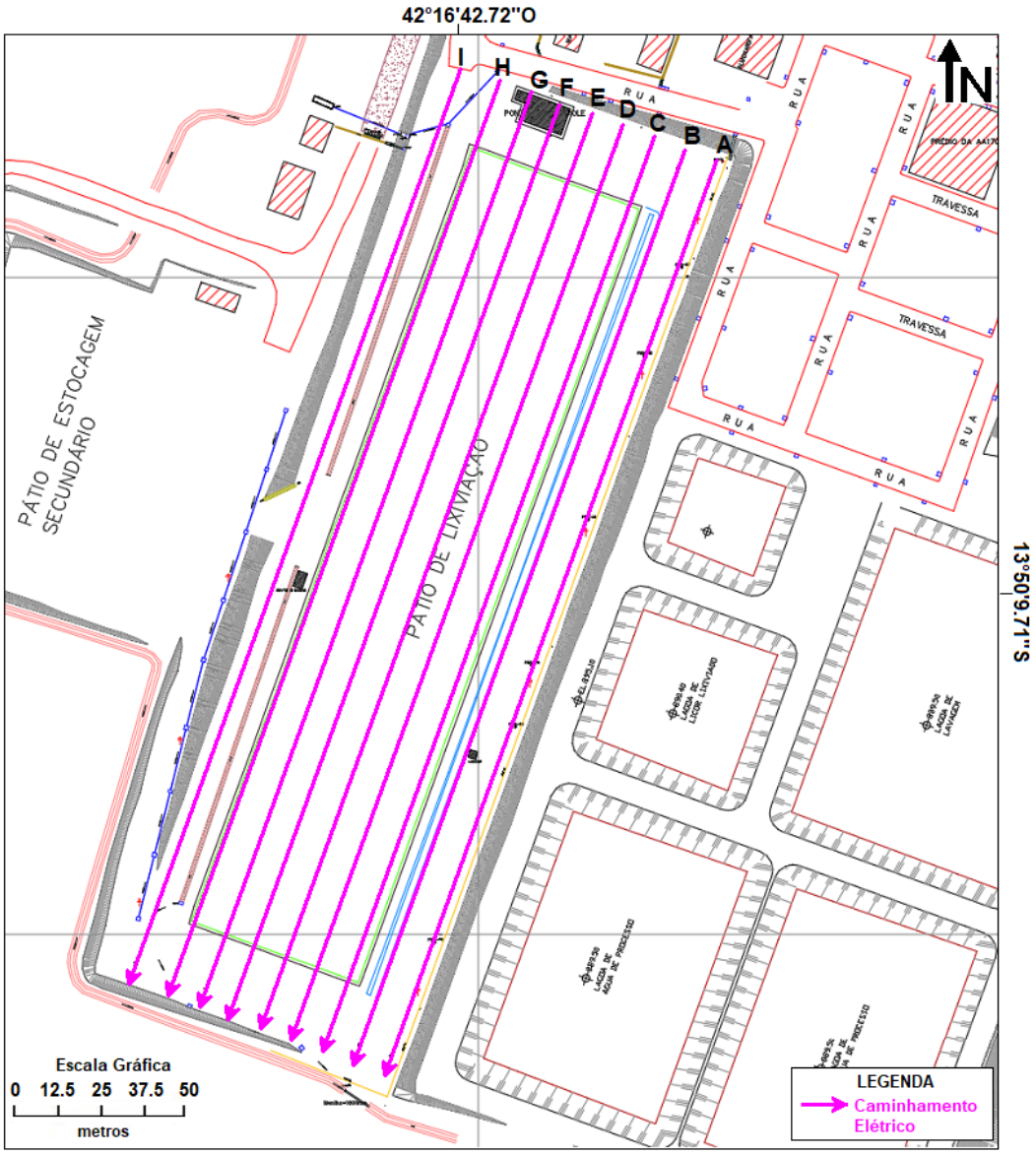
Figura 122 – Eletrodos cravados no terreno em perfil de Eletrorresistividade.



Fonte: O autor.

Estes perfis foram realizados no sentido de nordeste para sudoeste (Figura 123) pela técnica de caminhamento elétrico, equidistantes de 10,0 m e com 300 m de comprimento cada, adotado o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de eletrodos de 5,0 m.

Figura 123 - Posicionamento dos perfis de Eletrorresistividade na área.



Fonte: Autoria própria.

Nesta etapa, o resistivímetro, ou tomógrafo elétrico, utilizado em campo para a obtenção da resistividade elétrica foi o modelo WDJD-4 da BTSK *Geophysical Exploration Instrument* (Figura 124), fabricado na China, o qual se constitui em uma fonte de corrente de até 56 A e tensão máxima de 1.100 Volts de saída, com potência máxima de 6.600 W, proporcionando leituras digitais da corrente transmitida ao solo e do potencial resultante.

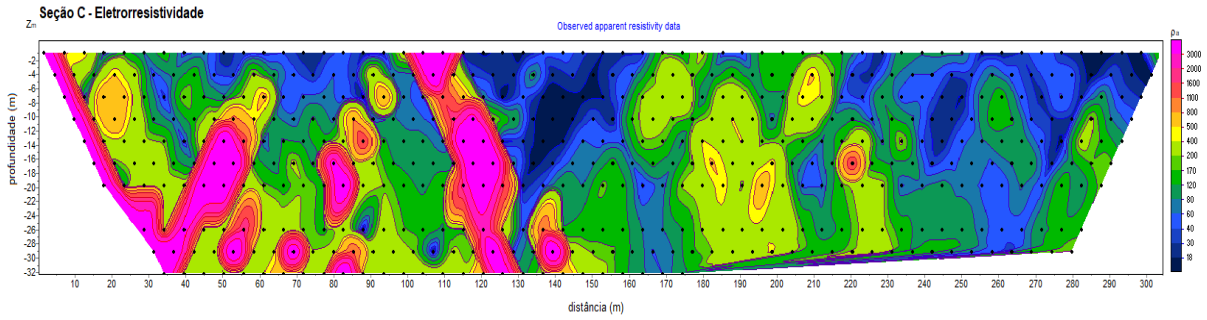
Figura 124 - Resistivímetro modelo WDJD-4 fabricado pela BTSK.



Fonte: O autor.

Os dados da Eletrorresistividade galvânica permitiram alcance a maiores profundidades que a Resistividade Capacitiva, até cerca de 32,0 m, proporcionadas pelos dez níveis totais de investigação como visto no exemplo da Figura 125.

Figura 125 - Exemplo de pseudo-seção de Eletrorresistividade: Linha C.



Fonte: Dados da pesquisa.

Desde a montagem do equipamento e arranjo, configuração dos parâmetros, aquisição de dados e desmontagem, o levantamento de Resistividade Capacitiva consome menos tempo que a Eletrorresistividade. Por outro lado, seu funcionamento é prejudicado em superfícies irregulares ou na proximidade aos objetos metálicos em forma de malha por perda do sinal como visto em ensaio-teste (seção 4.2.) e que não causam empecilhos ao método de Eletrorresistividade.

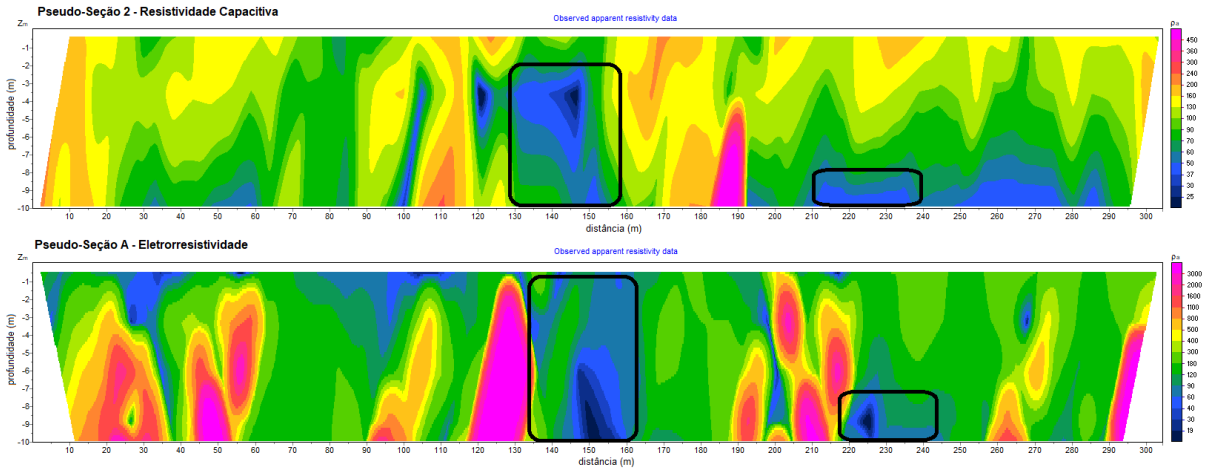
Em relação aos pavimentos de asfalto e concreto, o método capacitivo pode ser aplicado sobre essas superfícies sem maiores problemas que, do contrário, para a Eletrorresistividade pode exigir alternativas para o cravamento de eletrodos, tais como perfurações para ultrapassar esses tipos de revestimentos ou utilização de bases metálicas nos eletrodos para injeção de corrente elétrica.

Referente à apresentação das pseudo-seções correlatas desses métodos, essas tiveram suas profundidades máximas restritas a 10,0 metros (Figuras 126 a 134), o que resultou para este intervalo em três níveis de amostragens para a Resistividade Capacitiva, referente às três separações utilizadas, e quatro níveis para a Eletrorresistividade.

Desta maneira, foram comparadas pseudo-seções de dados brutos para aferição dos posicionamentos das zonas de baixos valores de resistividade elétrica e que estão associadas às eventuais presenças dos contaminantes inorgânicos e/ou metálicos, geradas por processamento no programa de inversão ZondRes2D, versão 5.2 (KAMINSKIY, 2010).

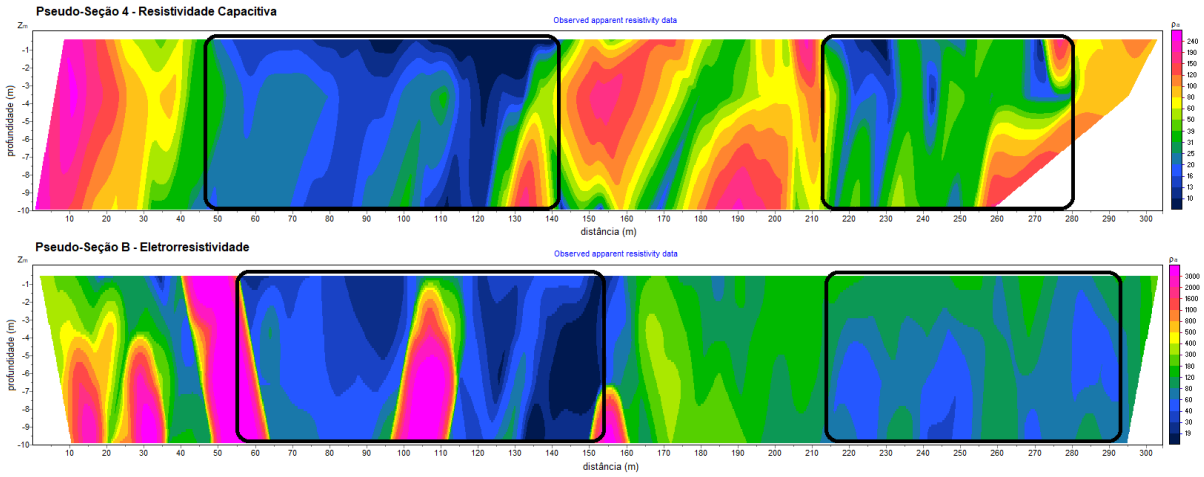
Nas imagens a seguir, constam as demarcações das principais regiões de baixas resistividades elétricas para os dois métodos empregados, onde a imagem superior se refere aos dados de Resistividade Capacitiva e a inferior aos dados de Eletrorresistividade.

Figura 126 – Pseudo-seções 2 (capacitiva) e A (Eletrorresistividade).



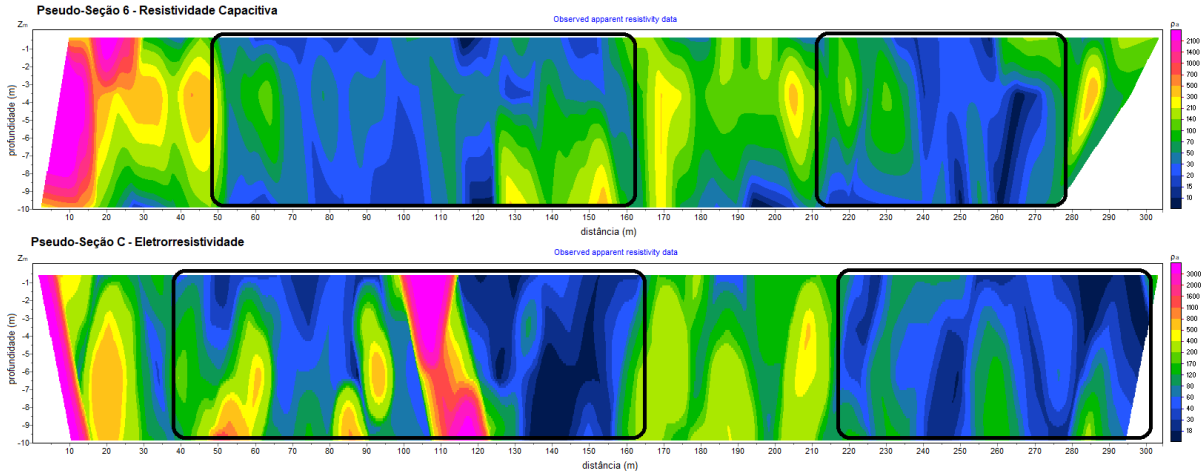
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 127 - Pseudo-seções 4 (capacitiva) e B (Eletrorresistividade).



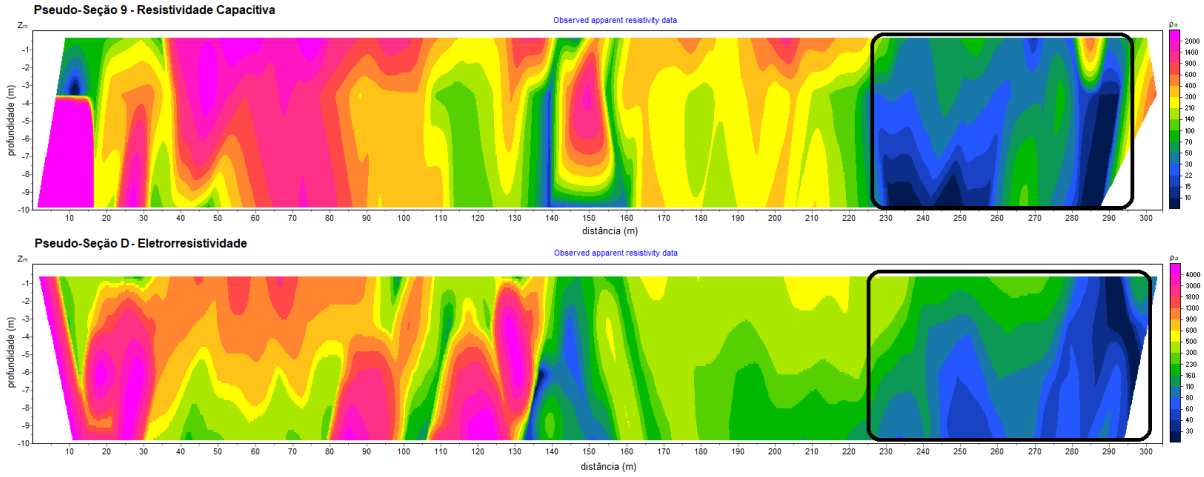
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 128 - Pseudo-seções 6 (capacitiva) e C (Eletrorresistividade).



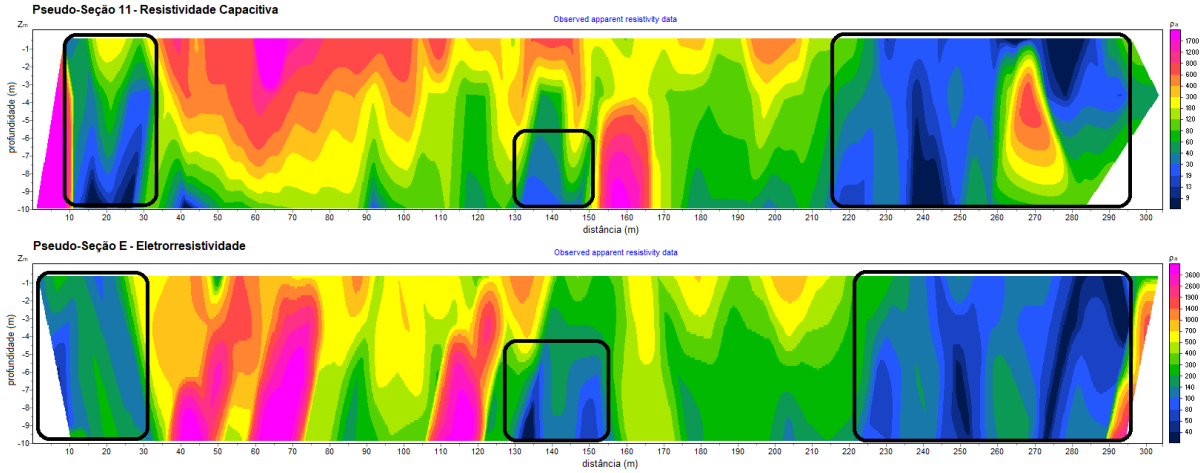
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 129 - Pseudo-seções 9 (capacitiva) e D (Eletrorresistividade).



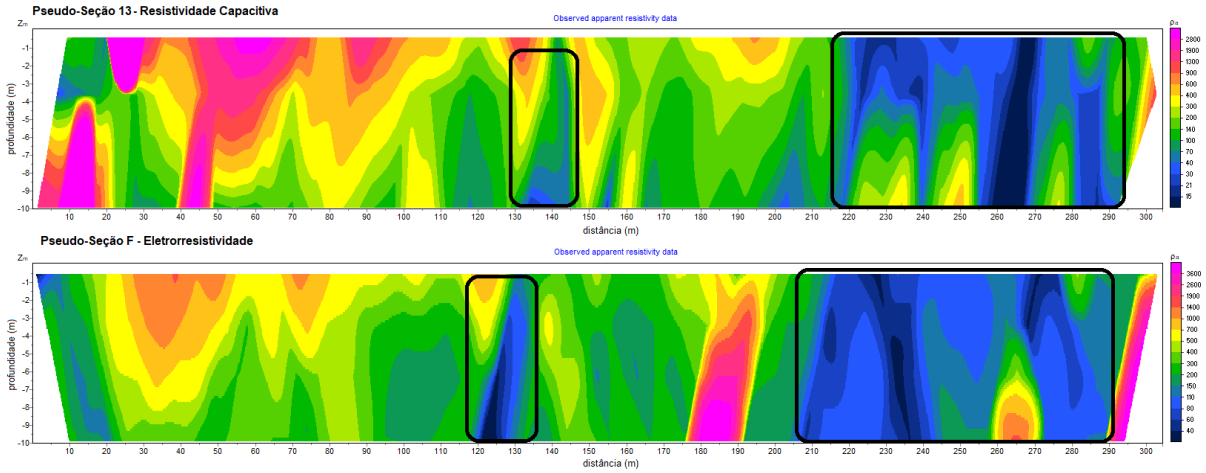
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 130 - Pseudo-seções 11 (capacitiva) e E (Eletrorresistividade).



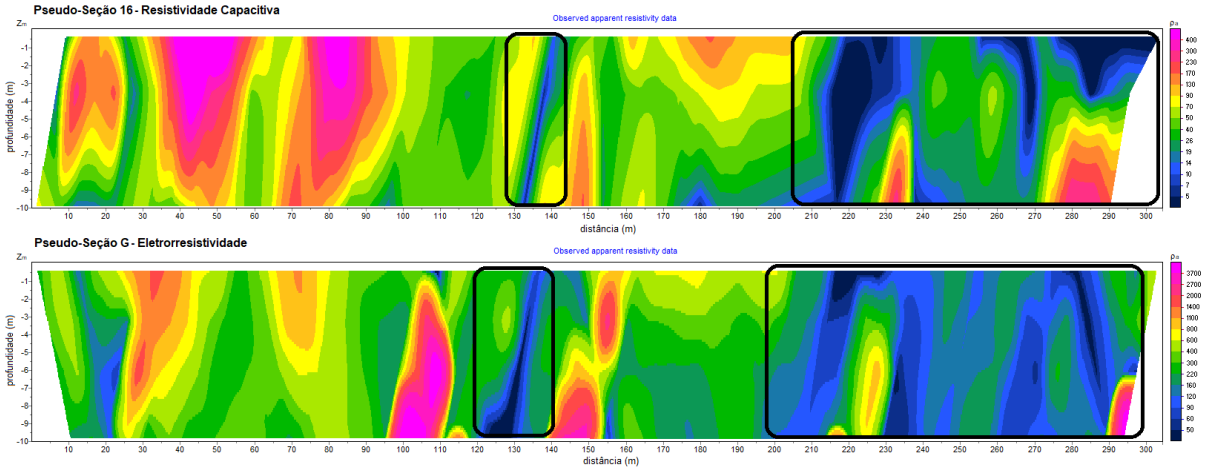
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 131 - Pseudo-seções 13 (capacitiva) e F (Eletrorresistividade).



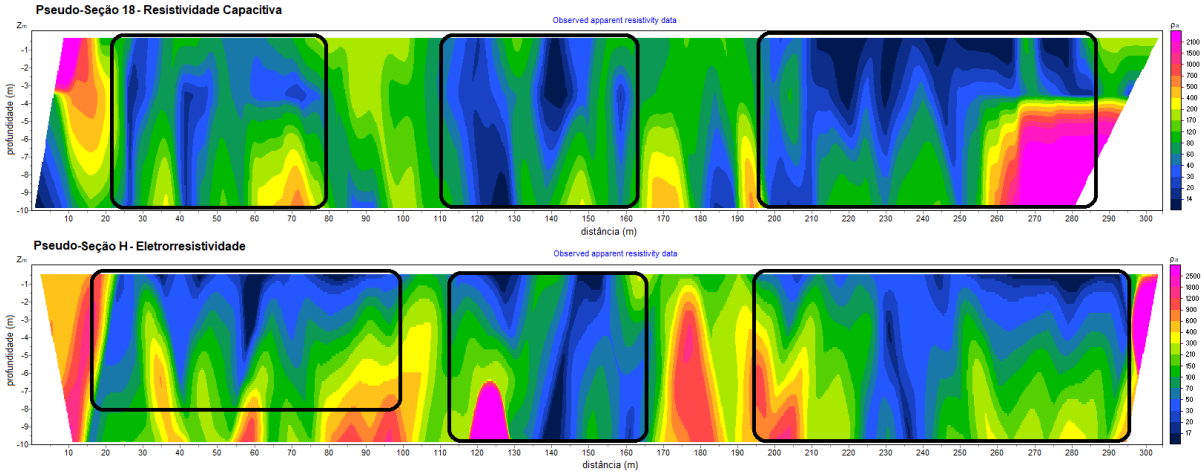
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 132 - Pseudo-seções 16 (capacitiva) e G (Eletrorresistividade).



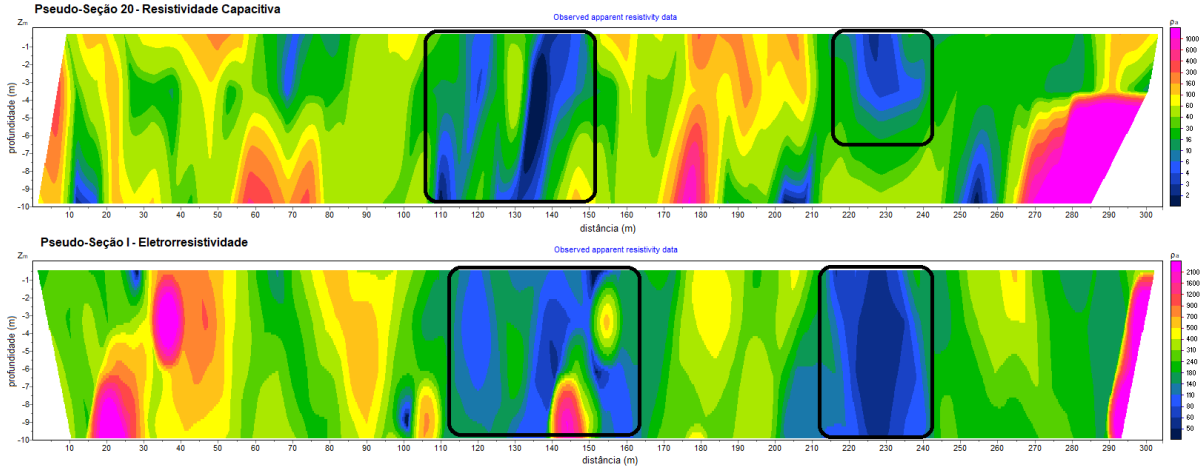
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 133 - Pseudo-seções 18 (capacitiva) e H (Eletrorresistividade).



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 134 - Pseudo-seções 20 (capacitiva) e I (Eletrorresistividade).



Fonte: Dados da pesquisa.

Com base nos dados anteriores, foi montada a Tabela 13 onde são apresentados os intervalos de medições dos perfis (amostragem horizontal), os trechos anômalos identificados de cada pseudo-seção de Resistividade Capacitiva, de sua correspondente de Eletrorresistividade e as escalas gerais de variações de resistividades elétricas.

Tabela 13 - Trechos anômalos e variação de resistividades das seções.

Pseudo-seção	Intervalo de medidas (amostragem)	Trecho anômalo	Trecho anômalo	Trecho anômalo	Variação geral de resistividade (ohm.m)
2	0,84 m	128 a 158 m	210 a 240 m	-	25,0 a 450
A	5,00 m	133 a 162 m	217 a 242 m	-	19,0 a 3.000
4	0,83 m	47 a 141 m	212 a 280 m	-	10,0 a 240
B	5,00 m	55 a 153 m	215 a 292 m	-	19,0 a 3.000
6	0,88 m	47 a 162 m	211 a 278 m	-	10,0 a 2.100
C	5,00 m	38 a 165 m	218 a 300 m	-	18,0 a 3.000
9	0,98 m	226 a 296 m	-	-	10,0 a 2.000
D	5,00 m	225 a 300 m	-	-	30,0 a 4.000
11	0,96 m	09 a 33 m	130 a 151 m	216 a 295 m	9,0 a 1.700
E	5,00 m	01 a 31 m	128 a 155 m	222 a 295 m	40,0 a 3600
13	0,87 m	129 a 147 m	215 a 294 m	-	15,0 a 2.800
F	5,00 m	118 a 135 m	206 a 291 m	-	40,0 a 3.600
16	0,80 m	128 a 144 m	205 a 300 m	-	5,0 a 400
G	5,00 m	120 a 140 m	198 a 299 m	-	50,0 a 3700
18	0,79 m	21 a 80 m	110 a 163 m	196 a 287 m	14,0 a 2.100
H	5,00 m	15 a 99 m	113 a 165 m	195 a 295 m	17,0 a 2.500
20	0,87 m	105 a 152 m	216 a 242 m	-	2,0 a 1.000
I	5,00 m	112 a 163 m	212 a 242 m	-	50,0 a 2.100

Fonte: Dados da pesquisa.

De maneira geral, os dados comparativos anteriores apontam a coincidência de posicionamentos das zonas de baixas resistividades elétricas na maior parte das pseudo-seções correspondentes e expressam uma correlação direta entre esses resultados.

Portanto, essas correspondências de localizações são indicativas da similaridade na detecção de anomalias da Resistividade Capacitiva até a profundidade considerada de 10,0 m quando comparada à Eletrorresistividade, que é um método consagrado neste tipo de aplicação como visto nas pesquisas ambientais de Becegato *et al.* (2009) e Moreira *et al.* (2019).

Referente aos valores de resistividade elétrica medidos que constam da Tabela 13, as escalas de variação (amplitudes das medidas) atingidas pela Resistividade Capacitiva são sempre menores que os da Eletrorresistividade galvânica e com limites inferiores também mais baixos, exceção às seções 2 e A.

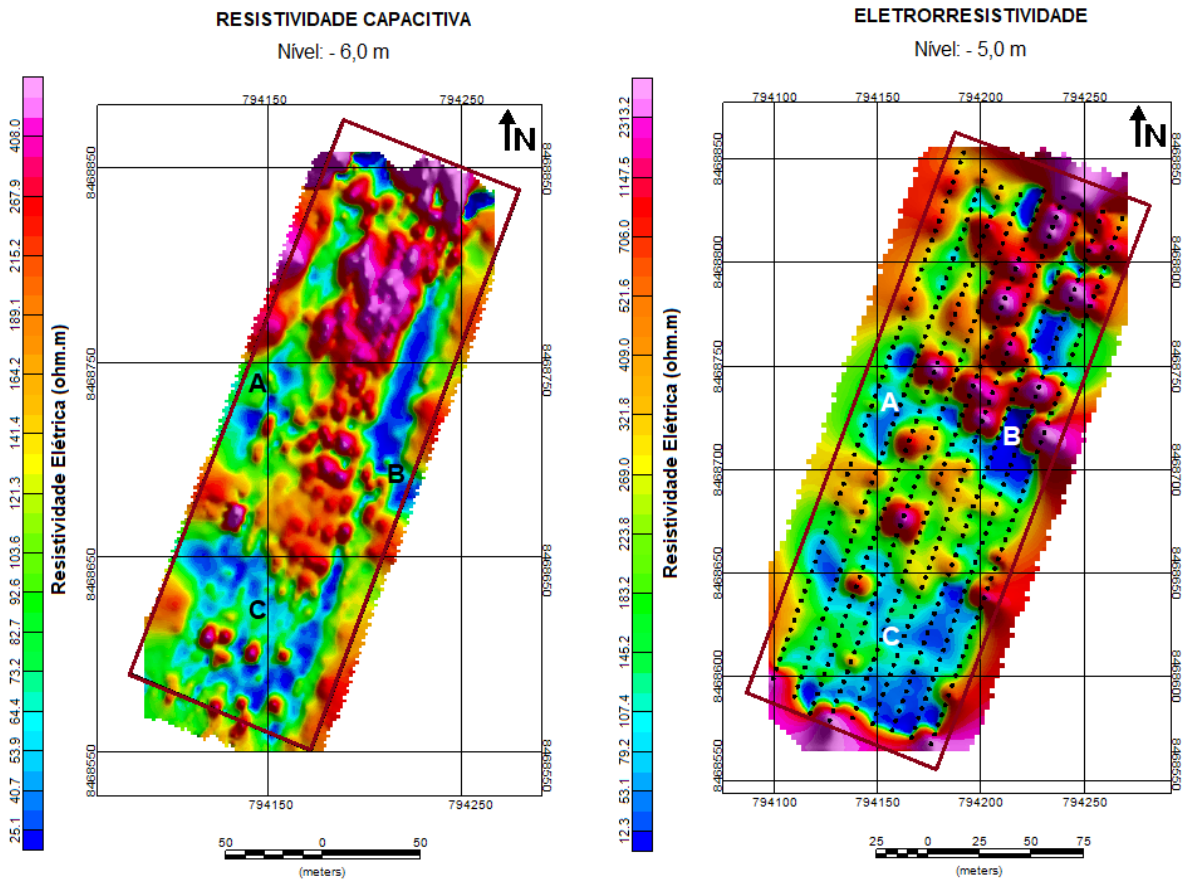
Inicialmente, estas discrepâncias nas medidas decorreram das diferenças entre os fatores geométricos da Resistividade Capacitiva (K_{LA}) e da Eletrorresistividade galvânica (K_{dd}) e que, comparativamente, resultam em cálculos sempre menores dos valores obtidos de resistividade elétrica na aquisição realizada pelo método capacitivo e já discutidas na seção 3.5..

Outra razão para isto é que os contaminantes inorgânicos ou metálicos presentes tornaram o ambiente muito condutivo eletricamente (de baixas resistividades elétricas) onde os efeitos dielétricos e eletromagnéticos não são totalmente negligenciáveis, situação que foge da condição ideal de regime *quasi-estático* e, portanto, afeta as medições do método de Resistividade Capacitiva, que por outro lado não influencia de forma significativa as medidas adquiridas pela Eletrorresistividade por contato galvânico.

De forma similar ao efetuado aos imageamentos de Resistividade Capacitiva, os dados obtidos pela aplicação da Eletrorresistividade também foram plotados em planta, sendo confeccionados mapas em corte nas profundidades de 5,0 m (zona não saturada) e 10,0 m (zona saturada) empregando-se o programa Oasis-Montaj, versão 6.4 (GEOSOFT, 2007), adotando-se o método de krigagem para interpolação.

Para análise comparativa dos resultados nesta fase, os mapas de profundidades aproximadas desses dois métodos foram colocados lado a lado, apresentados na sequência nas Figuras 135 e 136.

Figura 135 - Resistividades elétricas obtidas na zona não saturada.

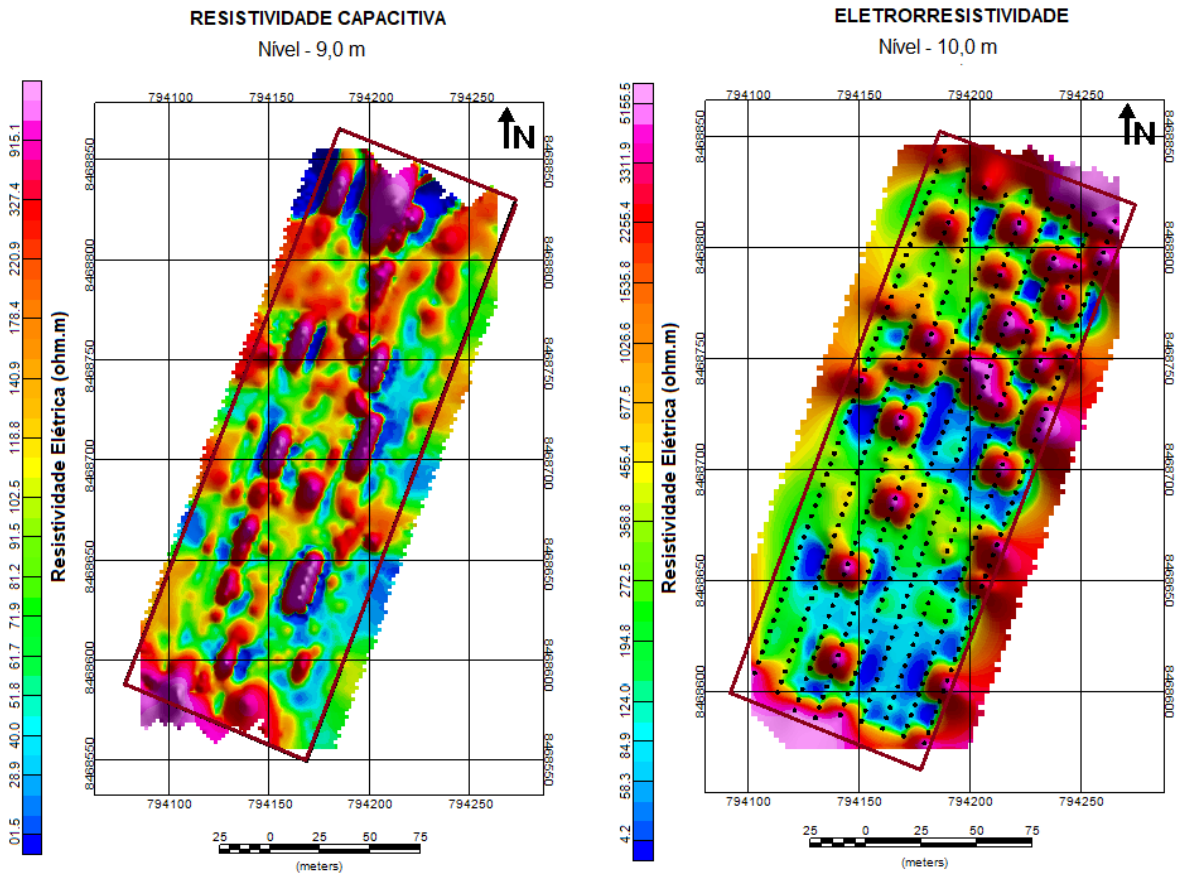


Fonte: Dados da pesquisa.

Antes de qualquer análise, merece destaque que o mapa de Resistividade Capacitiva apresenta maior resolução das feições geológicas devido ao menor intervalo de medidas (média total de 1,31 m) e a maior quantidade de perfis que os da Eletrorresistividade, que permitiu o maior detalhamento no primeiro método, mas que não inviabiliza uma avaliação geral e comparativa da distribuição das anomalias na área.

Desta maneira, os resultados obtidos de resistividade elétrica da zona não saturada (Figura 135) apontam uma correlação direta por meio de variações de resistividades semelhantes para os dois métodos, com regiões anômalas de menores valores aproximadamente coincidentes, representadas pelas zonas A, B e C, e com zonas mais resistivas predominantes ao norte.

Figura 136 - Resistividades elétricas obtidas na zona saturada.



Fonte: Dados da pesquisa.

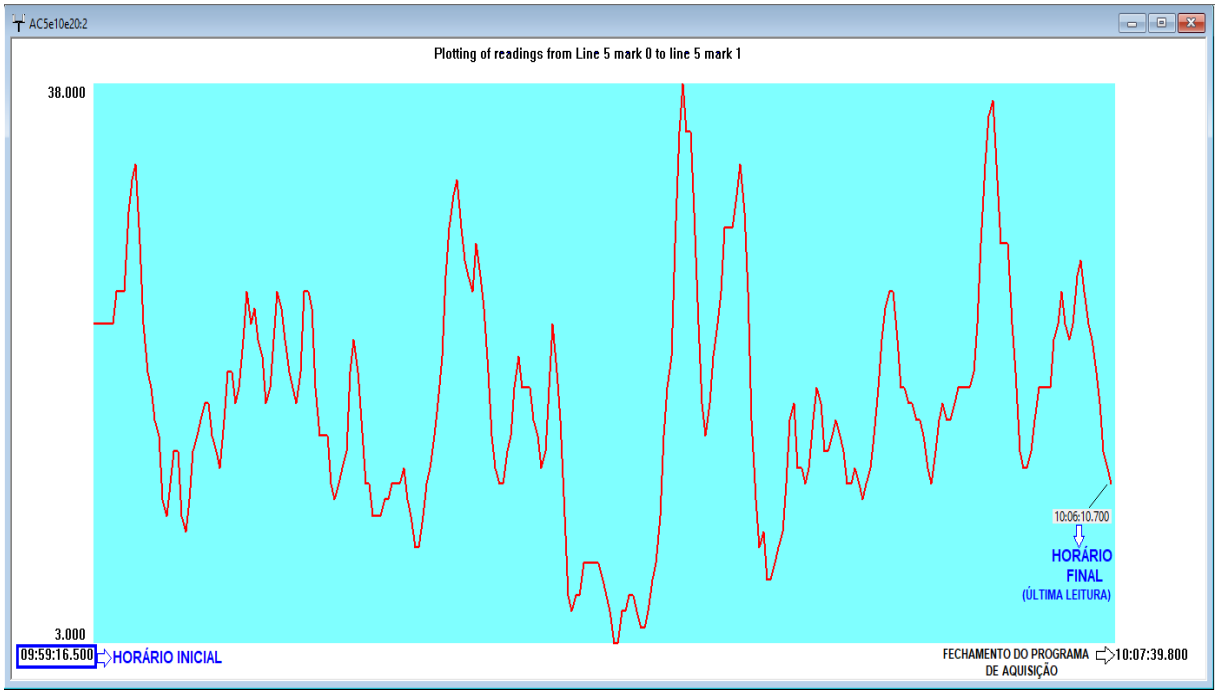
Referente aos resultados de resistividades elétricas do topo da zona saturada, cujos mapas de corte de profundidades são apresentados na Figura 136, estes expressam a presença aleatória de maior quantidade de pontos com baixas resistividades por toda a área para ambos os métodos e que podem representar pequenos focos difusos dos compostos inorgânicos ou metálicos decorrentes da provável dissolução, dispersão na água subterrânea e acúmulo em determinados locais.

Entretanto, o mapa da Resistividade Capacitiva apresenta um comportamento mais heterogêneo e difuso nos valores obtidos em relação à Eletrorresistividade que preserva similaridade ao mapa do nível mais raso. Para o método capacitivo, este aspecto diferenciado está associado ao limite de penetração da corrente elétrica reduzido pela maior condutividade elétrica no topo da zona saturada (efeito *skin*

depth), que afeta sua relação sinal/ruído neste nível de investigação, e que não influência o modo galvânico, cujo sinal atinge maiores profundidades.

Para aferição do tempo dispendido no levantamento capacitivo da área e onde haviam restrições de permanência, foram utilizados os dados originais do programa Magmap2000 conforme o exemplo da Figura 137 e que registra os momentos de início e fim das leituras pelos disparos em tempo do sinal elétrico (em apêndice).

Figura 137 – Perfil de Resistividade Capacitiva com horários de aquisição.



Fonte: Dados da pesquisa.

No geral, o número médio de leituras para o método de Resistividade Capacitiva foi de 233 por perfil, com intervalo de medidas a cada 1,31 m e tempo médio dispendido de 04 minutos e 11 segundos, o que, considerado o comprimento total de uma linha de 300 m, resulta numa velocidade média de aquisição de 4,3 km/h.

Assim, nas medições de três perfis de uma seção capacitiva com equipamento monorreceptor, o tempo médio estimado é de 12,0 minutos e 33,0 segundos, que somados a 7,0 minutos de montagem dos componentes e configuração no programa operacional, além de 2,0 minutos na troca dos comprimentos das cordas de separação, totalizam 21 minutos e 33 segundos para o completo imageamento elétrico numa distância de 300 m.

Mesmo que os tempos de aquisição de dados dos equipamentos de Eletrorresistividade e da Resistividade Capacitiva fossem iguais para os níveis de profundidades amostrados, o método galvânico dispende um intervalo médio de 15,0 minutos de montagem do arranjo dipolo-dipolo de 300 m com espaçamento de eletrodos 5,0 m e de acesso ao programa operacional, que é comparativamente maior, portanto, ao método capacitivo.

Como resultado das análises descritas não só deste tópico, como também de anteriores, foi elaborada a Tabela 14 e que se refere aos parâmetros comparativos entre os métodos de Resistividade Capacitiva e de Eletrorresistividade galvânica.

Tabela 14 - Comparação entre Resistividade Capacitiva e Eletrorresistividade.

Parâmetros	Resistividade Capacitiva	Eletrorresistividade (galvânica)	Observação
Tempo total de levantamento	Menor	Maior	-
Profundidade de Investigação	Menor	Maior	Resistividade Capacitiva limitada pelo *skin depth*
Superfícies muito irregulares	Afetam	Não afetam	Provocam perda do sinal na Resistividade Capacitiva
Objetos metálicos em forma de malha	Afetam	Não afetam	Provocam perda do sinal na Resistividade Capacitiva quando próximos
Revestimentos de superfície	Não afetam	Afetam	Demandam alternativas na Eletrorresistividade para injeção de corrente
Resolução	Maior	Menor	Resistividade Capacitiva permite amostragens horizontais menores que 1,0 m
Escala de variação de resistividade	Menor	Maior	-
Detecção de contaminação inorgânica	Sim	Sim	Vale também para os compostos metálicos
Sensibilidade à contaminação inorgânica	Alta	Alta	Quebra de regime *quasi-estático* para a Resistividade Capacitiva
Tipologia da anomalia	Valores numéricos	Valores numéricos	-
Resistividades das anomalias de inorgânicos	Baixas	Baixas	Vale também para os compostos metálicos

Fonte: Dados da pesquisa.

5. DISCUSSÕES FINAIS

Inicialmente, verificou-se que a classificação vigente para os métodos geoelétricos aplicados às investigações hidrogeológicas necessitava de atualização e ajustes que permitissem a inserção do método de Resistividade Capacitiva, bem como a inclusão de outros métodos geofísicos que combinem formas distintas de emissão e de recepção do sinal.

Em decorrência deste fato, foi proposta uma nova classificação aplicada também aos métodos geofísicos empregados aos estudos ambientais de contaminação subterrânea, e que é estruturada nas características individuais dos métodos conforme seus fatores de definição, que passam a ser a propriedade física medida e/ou o tipo de fonte de emissão do sinal, mais aberta às possibilidades de surgimento no futuro de novos métodos.

O ensaio efetuado para aferição da separação máxima entre os dipolos transmissor e receptor para captação do sinal, relacionada ao cálculo do parâmetro *skin depth*, foi viável e com maior precisão que o indicado pelo fabricante do equipamento Ohmmapper. Os resultados obtidos revelam sua importância como rotina preliminar a uma investigação de níveis mais profundos e que exijam uma distância maior de emissão e de recepção, além de proporcionar a avaliação da anisotropia lateral de resistividade elétrica do terreno.

Portanto, o teste na forma como foi realizado confirmou a influência dos menores valores de resistividade elétrica na atenuação do campo elétrico transmitido em subsuperfície ao reduzir a profundidade de alcance do método de Resistividade Capacitiva, conforme calculado pelo parâmetro *skin depth* e que se associa aos fenômenos eletromagnéticos.

Sobre à investigação da perda de sinal quando da execução das medidas de Resistividade Capacitiva, verificou-se que esta pode ser originada tanto por irregularidades da superfície do terreno, onde a interrupção se inicia com ângulo de desnível medido maior que oito graus, como também por interferência ocasionada por proximidade aos corpos metálicos não massivos, em formato de malha (grelhas, alambrados, etc), cuja solução em campo se dá pelo afastamento do objeto ou até mesmo do reinício da linha quando as medidas não voltam a se restabelecer.

Na avaliação das condições de superfície das áreas de ensaios e estudos de caso, observou-se que corpos metálicos massivos (caminhões e contêineres), bem como a rede elétrica aérea, não apresentaram efeitos adversos aos dados obtidos pelo método capacitivo, diferentemente ao constatado pelas interrupções de sinal causadas nas leituras de campo pelos objetos metálicos não massivos na forma de malhas e já indicadas no parágrafo anterior.

Em relação às coberturas dos terrenos nos locais dos ensaios e dos diagnósticos de contaminação subterrânea, constituídas por asfalto, concreto armado ou mesmo solo compactado, nenhuma dessas superfícies apresentou dificuldades na realização dos perfis ou mesmo interferências nos dados obtidos de resistividade elétrica pela aplicação do método capacitivo, o que é uma das principais justificativas dos desenvolvedores desta metodologia de investigação subterrânea ao compararem-na com a Eletrorresistividade galvânica.

Na aferição da representatividade das feições de subsuperfície, esta pesquisa, de modo geral, indicou que a maior quantidade de perfis executados para um mesmo alinhamento promove uma amostragem mais detalhada e, consequentemente, uma melhor resolução dos contornos dos corpos, numa relação direta e esperada, portanto.

Por outro lado, dependendo dos objetivos do estudo, menor quantidade de perfis numa determinada seção com regularidade nos intervalos de profundidades amostrados pode apresentar melhores resultados para definição das feições subterrâneas que seções utilizando mais perfis em níveis irregulares de investigação, o que permite otimizar a execução de um levantamento de campo com menos linhas de amostragem.

Um dos parâmetros de maior importância para a definição mais acurada das feições subterrâneas (melhor resolução), que foi confirmado nos testes implementados nesta pesquisa, é o fator de proporcionalidade *n*, cujos valores ideais, correlacionados a um conjunto de separação entre as extremidades dos dipolos transmissor e receptor (“cordas não condutoras”), obedecem uma sequência matemática de fração binária e assumem até mais relevância que o maior número de perfis de amostragens para melhor determinação de contornos dos corpos.

Outra condição fundamental constatada neste estudo, tão importante como a sequência de fração binária fator de proporcionalidade *n*, se refere à relação entre o comprimento da “corda não condutora” (*S*) e a profundidade do alvo de interesse (*D*), onde a razão ideal entre esses elementos (*S/D*) será a que mais se aproxima de 1:1. Em termos de aplicação em campo da metodologia da Resistividade Capacitiva, esta relação aponta a necessidade de adoção de pelo menos uma corda de separação entre as extremidades dos dipolos ser aproximadamente igual à profundidade estimada do objeto ou da feição que se deseja investigar.

Como o menor comprimento numa sequência binária do fator de proporcionalidade *n* é de 1,25 m e a relação entre a esta distância e a profundidade do alvo (*S/D*) deve ser a mais próxima de 1:1, infere-se que o método de Resistividade Capacitiva diante desta restrição apresentará melhores resultados para definição das feições subterrâneas em profundidades superiores à 1,0 m e até o nível máximo definido pelo parâmetro *skin depth*.

Referente à amostragem horizontal de dados num imageamento de Resistividade Capacitiva, relacionada ao intervalo de distância com medições por disparo em tempo, seu valor deve ser condizente com a dimensão do alvo de interesse para melhor definição de contornos, bem como adequado a menor unidade de interpolação de dados médios (*smallest unit electrode spacing)* determinada pelo programa de inversão e, de forma ideal, associada à sequência da fração binária do fator *n*.

Em relação aos ajustes estatísticos entre as resistividade elétrica medidas e aquelas calculadas pelos programas de inversão, verificou-se que não necessariamente os modelos geoelétricos que possuem menores valores do erro quadrático médio (*RMS*) são aqueles que apresentam melhor resolução das feições de subsuperfície, mas sim os que possuem separações de transmissor e receptor (extensões das “cordas”) que obedecem a sequência de fração binária do fator *n*, o que corrobora com a primordial importância deste parâmetro geométrico.

Na análise comparativa do ensaio para localização de duto subterrâneo, constata-se que a Resistividade Capacitiva, apesar de ter possibilitado a detecção da eventual tubulação com resultados mais consistentes a profundidades maiores que 1,0 metro, não foi tão eficiente para este objetivo específico como o resultado apresentado pelo método geofísico de *GPR*, o qual possui grande precisão em função da maior resolução e discretização dos dados obtidos.

Porém, é previsível que abaixo de determinados níveis de investigação, onde os equipamentos *GPR* modelos localizadores de altas e médias frequências de operação começam a apresentar dificuldade de penetração do sinal em subsuperfície, principalmente em terrenos de baixas resistividades elétricas, o método de Resistividade Capacitiva poderá ser aplicado de forma alternativa na localização de dutos subterrâneos mais profundos.

De maneira geral, as diferentes litologias observadas nos locais de avaliação da presença de contaminantes subterrâneos, representada por sedimentos aluvionares na área de transbordo de resíduos e constituída por solo arenoso e rocha no pátio de beneficiamento mineral, não apresentaram nenhuma alteração significativa nos dados obtidos pela Resistividade Capacitiva que pudesse prejudicar ou impedir a detecção da contaminação em subsuperfície.

Além de possibilitarem a identificação de feições hidrogeológicas não usualmente observadas, como por exemplo zona de influência por bombeamento, as medições efetuadas com o método de Resistividade Capacitiva apresentaram grande capacidade para indicar contrastes nos dados obtidos quando os contaminantes inorgânicos e orgânicos estão presentes num mesmo ambiente geológico ao segregar seus efeitos traduzidos em menores ou maiores valores anômalos de resistividades elétrica respectivamente.

Mesmo com a alta resolução dos dados e maior rapidez de levantamento fornecidas pelo método *GPR* para a detecção da contaminação subterrânea, os resultados adquiridos pela aplicação da Resistividade Capacitiva foram mais precisos, sensíveis e assertivos, indicando, portanto, vantagens comparativas desta metodologia para o estudo e diagnóstico ambiental dos contaminantes de diferentes

naturezas presentes em subsuperfície, principalmente, pela potencialidade em discriminar as presenças de compostos orgânicos e inorgânicos.

Ao se tratar do tempo de aquisição de dados, o levantamento de Resistividade Capacitiva com equipamento monorreceptor utilizado neste estudo apresentou maior tempo dispendido que o método *GPR*, porém, do contrário, a obtenção de medidas de forma capacitiva se mostrou mais rápida ao ser comparada com o método de Eletrorresistividade galvânica, consideradas as configurações, as profundidades de amostragem e as condições locais observadas.

Os valores e faixas de variações de resistividade elétricas obtidos nesta pesquisa para a definição dos contaminantes subterrâneos não são absolutamente determinísticos, uma vez que as medidas adquiridas pela Resistividade Capacitiva podem variar de área para área em função, principalmente, das características da geologia local encaixante e das condições de acoplamento e contato com o terreno, tendo sido verificado que esta variabilidade é mais proeminente nos valores anômalos de contaminação orgânica do que da inorgânica.

Em relação à detecção das anomalias de baixas resistividades elétricas associados aos contaminantes inorgânicos, ou metálicos, foi constatado que os valores anômalos se apresentam de forma marcante e se encontram numa mesma faixa de variação de baixos valores, independentemente se o meio investigado é mais siltoso ou mais arenoso.

A partir desses resultados, infere-se que a presença de contaminações inorgânicas, ou mesmo metálicas, em concentrações elevadas reduz a resistividade elétrica em subsuperfície a tal ponto que o ambiente deixe de apresentar o regime *quasi-estático* ao método de Resistividade Capacitiva, prerrogativa para a operação normal desta metodologia, e, consequentemente, permite suas detecções em diferentes tipos de solos ao intensificar as condições anômalas.

Sem contar a influência da degradação dos compostos, nesta pesquisa foi observado que os contaminantes combustíveis apresentam sinais elétricos distintos em diferentes litologias, com menor percepção num solo mais arenoso de resistividade elétrica naturalmente alta, onde as anomalias só serão detectadas por meio de valores bem mais elevados, diferentemente ao verificado quando da presença

desses compostos nos materiais siltosos, presumivelmente com maior teor de argila, onde os contrastes são mais evidentes, porém com valores numéricos anômalos relativamente mais baixos.

Constata-se, deste modo, que os valores anômalos de resistividade elétrica para que um composto orgânico apresente um contraste detectável no ambiente onde está inserido dependerá, além da sua concentração, também da resistividade natural do material geológico encaixante (*background*), apresentando, assim, anomalias numericamente menores no meio siltoso e valores maiores no meio arenoso.

De maneira geral, há equivalência entre os resultados apresentados pela Resistividade Capacitiva e os da Eletrorresistividade galvânica quando da detecção de contaminação inorgânica e/ou metálica, porém os valores obtidos de resistividades elétricas indicaram uma faixa menor de variação das leituras e valores máximos mais baixos quando medidos de forma capacitiva, comprovando a premissa teórica da influência dos diferentes fatores geométricos desses dois métodos.

Quanto aos limites inferiores dos dados de resistividade elétrica, o método capacitivo apresentou frequentemente valores mais baixos, o que indica comparativamente a maior influência da contaminação subterrânea inorgânica ou metálica na quebra do regime *quasi-estático* em subsuperfície e que interferem de forma mais significativa em suas medidas, cujo efeito adverso, por outro lado, pode indicar uma maior sensibilidade desse método na detecção desses contaminantes.

Entretanto, em detrimento do menor tempo dispendido na aquisição e da alta resolução de dados da Resistividade Capacitiva em comparação à Eletrorresistividade, que são vantagens relativas importantes, sua penetração em profundidade é menor, principalmente quando os níveis de amostragem estão nos domínios da zona saturada por conta dos menores valores de resistividades elétricas, ou maiores condutividades, desta porção de subsuperfície (efeito *skin depth*), o que pode afetar a relação sinal/ruído das medições capacitivas, e que não influenciam as medidas de forma galvânica, cuja corrente elétrica, consequentemente, alcança níveis mais profundos.

6. CONCLUSÕES

A classificação anterior referente aos métodos geoelétricos em investigações hidrogeológicas foi revisada e atualizada, o que culminou na reclassificação aqui apresentada com a inclusão da Resistividade Capacitiva, também empregada aos métodos geofísicos para estudos ambientais de contaminação subterrânea, e mais aberta às possibilidades de surgimento no futuro de novos métodos.

O experimento para aferição da captação do sinal e determinação da separação máxima entre os dipolos transmissor e receptor confirmou o efeito da variação da resistividade elétrica do ambiente na atenuação do sinal elétrico emitido ao restringir a profundidade de investigação do método de Resistividade Capacitiva, de acordo ao previsto pelo parâmetro *skin depth*.

A perda de sinal nas medições de Resistividade Capacitiva pode ser originada tanto por irregularidades da superfície do terreno, como também por proximidade aos corpos metálicos não massivos, em formato de malha (grelhas, alambrados, etc). Do contrário, corpos metálicos massivos (caminhões e contêineres), bem como a rede elétrica aérea, não apresentaram efeitos adversos aos dados obtidos.

As coberturas por asfalto, concreto armado ou mesmo solo compactado dos locais de levantamentos não apresentaram influências na qualidade dos dados adquiridos de resistividade elétrica pelo aparato capacitivo.

O parâmetro mais relevante para melhor determinação de contornos dos corpos (maior resolução) é o fator de proporcionalidade *n* correlacionado a um conjunto de separação entre transmissor e receptor que obedece a uma sequência matemática de fração binária.

Outro elemento fundamental é a relação de 1:1 entre a separação das extremidades dos dipolos e a profundidade do alvo de interesse, que aponta a necessidade de realização de pelo menos um dos perfis com distância entre o transmissor e receptor (extensão da “corda”) igual ao nível estimado em subsuperfície onde se encontra a feição a ser investigada.

No ensaio de detecção de duto subterrâneo, constata-se que o método de Resistividade Capacitiva, apesar de ter possibilitado a localização da eventual tubulação, não apresentou resultados tão eficazes como o do método geofísico de *GPR*. Entretanto, o método capacitivo deverá ser uma alternativa para identificação de tubulações em níveis mais profundos quando os equipamentos de *GPR* de altas e médias frequências apresentarem dificuldades de penetração do sinal decorrente da baixa resistividade do ambiente.

Por outro lado, os resultados adquiridos pela aplicação da Resistividade Capacitiva foram mais precisos e assertivos que os do *GPR* no diagnóstico ambiental dos contaminantes orgânicos e inorgânicos num mesmo ambiente geológico, ao segregar seus efeitos traduzidos em valores anômalos de altas e baixas resistividades respectivamente, além de possibilitarem a identificação de feições hidrogeológicas não usualmente observadas.

Em relação à identificação de baixas resistividades elétricas provenientes dos contaminantes inorgânicos, ou metálicos, foi constatado que os valores anômalos se apresentam de forma perceptível e se encontram numa mesma faixa de variação, independentemente se o meio investigado é mais ou menos arenoso, e faz com que o ambiente deixe de apresentar o regime *quasi-estático* ao método de Resistividade Capacitiva em concentrações mais elevadas desses tipos de contaminação.

De outra forma, foi observado que as anomalias dos contaminantes orgânicos possuem comportamentos distintos em diferentes litologias, não tão evidentes num solo mais arenoso de resistividade elétrica naturalmente alta, com valores de detecção mais elevados, e em contrapartida, com contrastes mais marcantes nos materiais mais siltosos e com valores anômalos numericamente mais baixos.

A análise comparativa aponta que a Resistividade Capacitiva forneceu resultados tão confiáveis como os da Eletrorresistividade galvânica para a detecção de contrastes de resistividade elétrica e determinação de locais em subsuperfície com maior concentração de compostos inorgânicos e metálicos, porém, a despeito de sua maior resolução e menor tempo de levantamento, sua penetração é limitada pela condutividade elétrica do ambiente por meio do efeito do *skin depth*.

Conforme suas capacidades específicas, o método de Resistividade Capacitiva mostrou efetividade e contribuiu ao diagnóstico ambiental dos locais avaliados pela pesquisa e se enquadra satisfatoriamente como uma metodologia de investigação subterrânea a ser empregada no gerenciamento de áreas contaminadas, dentre outros métodos geofísicos já consolidados e frequentemente utilizados.

Do ponto de vista das Ciências Ambientais, sua aplicação não acarretou nenhuma alteração nas áreas investigadas, bem como nenhum dano aos bens materiais existentes, tampouco prejuízo às pessoas ou trabalhadores desses locais, características de uma metodologia altamente recomendável em estudos de contaminação subterrânea.

7. REFERÊNCIAS

ADAMS, C.H. **Capacitive array resistivity with an inductive source**. Tese de Doutorado. School of Applied Sciences, RMIT University, Melbourne, Australia, 243p, 2008. Disponível em https://researchrepository.rmit.edu.au/esploro/outputs/doctoral/Capacitive-array-resistivity-with-an-inductive/9921861501101341

ALMEIDA, F.M.; SOUZA, D.M.; LUIZ, J.G. Contaminação por hidrocarbonetos em postos de serviço de Abaetetuba -PA: Um estudo com georadar. **Anais do 4º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás (PDPETRO)**, Campinas, SP, 8p. 2007. Disponível em http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_6_2_0240-1.pdf

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard guide for selecting surface geophysical methods**. D 6429-99, 15p, 2006. https://civilnode.com/download-standard/10624173454249/astm-d6429-standard-guide-for-selecting-surface-geophysical-methods

AQUINO, W. F. **Métodos geofísicos eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico da contaminação do solo e das águas subterrâneas em área de infiltração de resíduos industriais**. Dissertação de Mestrado em Hidrogeologia e Recursos Minerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 112p, 2000. DOI: 10.11606/D.44.2000.tde-14102015-145159. Disponível em https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-14102015-145159/publico/Aquino_Mestrado.pdf

AQUINO, W.F.; DEHAINI, J. & MENDES J.M.B. Geo-Radar Para a Detecção de Contaminação por Hidrocarboneto**. Anais do II Encontro de Geotecnia e Meio Ambiente e II Workshop de Geofísica Aplicada**, Rio Claro – SP, 1998.

AQUINO, W.F.; TONELLO P.S.; RESENDE, P.R. Experimentation and indirect methods applied to investigate the contaminated areas. **Revista de Gestão e Sustentabilidade (GEAS).** Edição especial, p.568-586, 2019. Disponível em https://doi.org/10.5585/GEAS.V8I3.15782

ARATO, A.; WEHRER, M.; BIRÓ, B.; GODIO A. Integration of geophysical, geochemical and microbiological data for a comprehensive small-scale characterization of an aged LNAPL-contaminated site. **Environmental Science and Pollution Research,** v.21, p. 8948–8963, 2014. DOI 10.1007/s11356-013-2171-2

ASCH, T.H.; DESZCZ-PAN, M.; BURTON B.; BALL L., KRESS, W.; VRABEl J.; HUNTER, L.E. Geophysical Characterization of a levee with DC resistivity and electromagnetic measurements. **Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP).** p.739-748, 2008. https://doi.org/10.4133/1.2963315

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma n.15.935: Investigações ambientais: aplicações de métodos geofísicos**, 21p, 2011.

Disponível em https://pt.scribd.com/document/242288031/NBR-15-935-Investigacoes-ambientais-Aplicacao-de-metodos-geofisicos-pdf

AYOLABI E.A.; FOLORUNSO A. F.; KAYODE O. T. Integrated Geophysical and Geochemical Methods for Environmental Assessment of Municipal Dumpsite System. **International Journal of Geosciences**, v.4, p. 850-862, 2013. Disponível em http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.45079

BECEGATO, V.A.; STEFANATO, R.; FERREIRA, F.J.F.; CUNHA, J.U.; CABRAL, J.B.P. Investigações geofísicas aplicadas no lixão desativado do município de Saudade do Iguaçu - PR. **Revista Geográfica Acadêmica** v.3, n.1, p. 47-55. 2009. Disponível em https://docplayer.com.br/25089384-Investigacoes-geofisicas-aplicadas-no-lixao-desativado-do-municipio-de-saudade-do-iguacu-pr.html

BICUDO, T.C. **Caracterização de contaminação por hidrocarboneto creosoto utilizando os métodos GPR e Eletrorresistividade**. Dissertação de Mestrado em Geofísica. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 100p, 2021. Disponível em https://doi.org/10.11606/D.14.2021.tde-06072021-190631

BLAKSTAD, O. **Research designs.** Disponível em https://explorable.com/research-designs. Acessado em 03/03/2020.

BORGES, W.; LAGO, A.; FACHIN, S.; ELIS, V.; SANTOS, E. GPR utilizado na detecção da geometria de cavas usadas para disposição de resíduos de óleos lubrificantes. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 483-494, 2006. Disponível em https://doi.org/10.1590/S0102-261X2006000400003

BORNER F., GRUHNE M.; SCHON J. Contamination indications derived from electrical properties in the low frequency range. **Geophysical Prospecting**, v. 41, p. 83-98, 1993. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1993.tb00566.x

BORTOLOZO, C.A. **Inversão conjunta 1D de dados de SEV e TDEM: aplicações em hidrogeologia**. Dissertação de Mestrado em Geofísica. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. 102p, 2011. Disponível em https://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d_cassiano_a_bortolozzo_original.pdf

BOTELHO M.A. & ARAÚJO, E.M. O emprego do Radar de Penetração no Solo (GPR) no controle de qualidade de rochas ornamentais extraídas em terrenos intemperizados. **Anais do IV Simpósio de Rocha Ornamentais do Nordeste**. Fortaleza, CE, 2003. Disponível em https://manualzz.com/doc/5951283/visualizar-abrir---mineralis---centro-de-tecnologia-mineral. Acesso em 11/11/2021.

BRAGA, A.C.O. **Métodos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. Tese de Livre Docência, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, SP, Brasil. 126p, 2006. Disponível em https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/116123/braga_aco_ld_rcla.pdf

BRAGA, A.C.O. & CARDINALLI, M.T. Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.23, n.2. p.181-190, 2005. Disponível em https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000200007

CALVERT, H.T. (2002) Capacitive-coupled resistivity survey of ice-bearing sediments, Mackenzie Delta, Canada, **Proceedings of International Exposition and 72nd Annual Meeting of SEG**, Salt Lake City, Utah, 4p, 2002. Disponível em https://geometrics.com/wp-content/uploads/2018/10/seg2002.pdf

CARMONA, E.A.F.; BARBOSA, A.M.; USTRA A.; ELIS V.; MENDONÇA, C. Aplicação do método resistivo-capacitivo para investigação de uma área contaminada por creosoto. **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf)**, Salinópolis - PA. 4p. 2018. Disponível em https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/VIII_SimBGf

CARTWRIGHT, K., & McCOMAS, M. R. Geophysical Surveys in the Vicinity of Sanitary Landfills in Northeastern Illinois. **Ground Water**, v.6, n.5, p.23-30, 1968. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1968.tb01661.x

CARTWRIGHT, K. & SHERMAN, F. Electrical earth resistivity surveying in landfill investigations. **Proceedings of Annual Engineering and Soils Engineering Symposium**, p. 77-92, 1972.

CAVALCANTI, M.M. **Delineamento da pluma de contaminação nos limites do Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 111p, 2013. Disponível em https://repositorio.unb.br/handle/10482/13449

CAVALLARI, F.; MOREIRA, C.A.; HELENE, L.P.I. Environmental geophysical diagnosis of a contaminated area by hydrocarbons is a railway accident in the municipality of Botucatu-SP, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.36, n. 4, p. 527-540, 2018. Disponível em http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v36i4.865

CAVENAGHI, V.L.S. **Caracterização geoelétrica de alvos rasos no Sítio Controlado de Geofísica Rasa II – IAG-USP através de resistividade capacitiva.** Dissertação de Mestrado em Geofísica. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. 148p. 2017. Disponível em http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14132/tde-04062018-122616/. Acesso em 22/01/2022.

COAMB – COORDENADORIA AMBIENTAL. **Mapas de isoconcentração de amostras de solo obtidas em sondagens executadas no município de Caetité, Bahia.** 51p, 2018.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. Programa CETESB/GTZ. São Paulo. 389p, 2001.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo. São Paulo,** 12p, 2020. Disponível em https:// https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2021/03/TEXTO-EXPLICATIVO-2020.pdf

CHAPMAN, S. J.; HEWETT, D. P. & TREFETHEN, L. N. Mathematics of the Faraday Cage. **SIAM Review**, v. 57, n.3, p.398–417, 2015. https://doi.org/10.1137/140984452

CORDEIRO, W. & MARINHO, J.M.L. Aplicação hidrogeológica do método geofísico VLF (Very Low Frequency) em áreas de coberturas sedimentares cenozoicas do Ceará, Brasil. **Proceedings of 1st Joint World Congress on Groundwater**. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), Fortaleza-CE, 17p, 2000. Disponível em https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23508/15592

COSTA, A.F.U. & FERLIN, C.A. Aplicação prática de métodos elétricos na detecção e monitoramento da contaminação de águas subterrâneas. **Anais do II Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf)**, Rio de Janeiro-RJ, p. 1210-1212, 1993.

COUTINHO, J.M. Carta geológica da Região Metropolitana da Grande São Paulo. São Paulo, **EMPLASA**, 2 folhas, Escala 1:100.000, 1982.

DANIELS, J.J., ROBERTS, R., VENDL, M. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p.195-207, 1995.

DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v.37, n.5, p 531-551, 1989. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x

DEHAINI, J. **Detecção da pluma de contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração.** Tese de Doutorado em Hidrogeologia e Recursos Minerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 159p, 2001. Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-12112015-142741/pt-br.php

DOLL, W.E.; GAMEY, T.J.; NYQUIST, J.E.; MANDELL, P.A.W.; GROOM, D., ROHDEWALD, S. **Evaluation of new geophysical tools for investigation of a landfill, Camp Roberts, California**. 13p, 2001. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/237712291_Evaluation_of_new_geophysical_tools_for_investigation_of_a_landfill_Camp_Roberts_California. Acessado em 03/10/2019.

ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. Caminhamento elétrico dipolo-dipolo - uma técnica eficiente na investigação de depósitos de resíduos. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, Rio de Janeiro-RJ, Vol I, p. 39-48, 1996.

ELIS, V.R. & ZUQUETTE L.V. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólido urbanos. **Revista Brasileira de Geociências**, v.32, n.1, p. 119-134, 2002. Disponível em http://www.resol.com.br/textos/10370-35493-1-pb.pdf

ELLERT, N., GREENHOUSE J.P., WILLIAMS, M.M., MENDES, J.M.B., & HASSUDA, S. A geofísica aplicada na identificação da poluição do subsolo por depósito de rejeitos urbanos e industriais. **Anais do IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas***,* v.2, n.4, p. 528-532, 1986. Disponível em https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23626/15705

ELLERT, N. & ROSA FILHO, E. A geofísica aplicada na detecção e lixo urbano enterrado. Exemplo Curitiba, Paraná, BR. **Anais do V Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, São Paulo-SP, p. 237-246, 1988. Disponível em https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22670/14873

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Use of Airborne, Surface and Borehole Geophysical Techniques at Contaminated Sites. A Reference Guide EPA/625/R-92/007.** Washington: Eastern Research Group. 304p, 1993. Disponível em https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/geophysics-guide.pdf

FERREIRA, L.M. **Compósitos de PVC/nanotubos de carbono: Influência do estabilizante nas propriedades térmicas e elétricas.** Trabalho de Conclusão de Bacharelado de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, 18p, 2009. Disponível em https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/99830/Larissa.pdf?sequence=1

FERREIRA, S.M.; OLIVEIRA, E.; DUARTE, U. Comportamento da Gasolina com Etanol (E-20) e da Gasolina Pura Após a Simulação de um Vazamento em Colunas de Laboratório. Geologia USP Série Científica. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v. 4, n. 2, p. 91-102, 2004. Disponível em https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/27401/29173

GALLAS, J.D.F.; TAIOLI, F.; SILVA, S.M.C.P.; COELHO, O.G.W.; PAIM, P.S.G. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v 23, n.1, p. 51-59, 2005. Disponível em https://www.readcube.com/articles/10.1590%2Fs0102-261x2005000100005

GARMAN, K.M. & PURCELL, S.F. Applications for capacitively coupled resistivity surveys in Florida. **The Leading Edge**, p. 697-698, 2004. https://doi.org/10.1190/1.1776744

GASPERIKOVA E.; HUBBARD S. S.; WATSON D. B.; BAKER G.S.; PETERSON J.E.; KOWALSKY M.B.; SMITH M., BROOKS, S. Long-term electrical resistivity monitoring of recharge-induced contaminant plume behavior. **Journal of Contaminant Hydrology**, n.142–143, p. 33–49, 2012. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2012.09.007

GEMAIL, K.S.; EL-SHISHTAWY A.M.; EL-ALFY M.; GHONEIM M.F.; ABD EL-BARY M.H. Assessment of aquifer vulnerability to industrial waste water using resistivity measurements. A case study, along El-Gharbyia main drain, Nile Delta, Egypt. **Journal of Applied Geophysics**, v.75, p. 140-150, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.026

GEOMETRICS INC. **Manual de operação do equipamento OhmMapper TR1 29005-01. Rev.F.** 147p. 2001.

GEORGE A.M. & KARKHANAVALA M.D. (1963) Studies of the electrical properties of uranium oxides – I. Electrical conductivity of $\alpha.U_3O_8$. **Jounal of Physics and Chemical Solids**. Pergamon Press. Vol.24. p. 1207-1212, 1963. https://doi.org/10.1016/0022-3697(63)90238-5

GEOSOFT - GEOSOFT INCORPORATED. **Oasis-Montaj Standart Edition**, versão 6.4, Software Manual, CD Rom, 2007.

GRARD, R. & TABBAGH A. A mobile four-electrode array and its application to the electrical survey of planetary grounds at shallow depths. **Journal of Geophysical Research**, v.96, n. B3, p. 4117-4123, 1991. DOI:10.1029/90JB02329

GIUSTI L. A review of waste management practices and their impact on human health. **Waste Management**, v.29, n.8, p. 2227-2239, 2009. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.028

GREENHOUSE, J.P. Environmental geophysics: it´s about time. **Geophysics: The Leading Edge**, v.10, p. 32-34, 1991. https://doi.org/10.1190/1.1436775

GREENHOUSE, J.P & HARRIS R.D. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study. DC, VLF and Inductive Resistivity Surveys. **Journal of Hydrology**, v.63, p. 177-197, 1983. https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90227-5

GRETSKY, P.; BARBOUR, R. & ASIMENIOS, G.S. Geophysics, pit surveys reduce uncertainty. **Pollution Engineering**, p. 102-108, 1990.

GROOM, D. Common misconceptions about capacitively-coupled resistivity (CCR) - What it is and how it works. **Proceedings of 21st EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems - SAGEEP**, Philadelphia, Pennsylvania, 6p, 2008. https://doi.org/10.4133/1.2963245

GURGEIRA, M.D. **Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo.** Dissertação de Mestrado em Geoquímica e Geotectônica. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 80p, 2013. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44141/tde-14112013-104040/publico/DissertacaoMestradoMagalioriginal.pdf

HACKBARTH, D. A. Field study of subsurface spent sulphide liquor movement using earth resistivity measurements. **Ground Water**, v.9, p. 11-16, 1971. DOI:10.1111/j.1745-6584.1971.tb03546.x

HAYASHI K.; ABE T.; TANAKA T.; KONISHI C. Application of an integrated geophysical method to levee evaluation. **Proceedings of Fourth International Conference on Scour and Erosion**, Tokyo, Japan. p. 295-301. 2008. Disponível em https://izw.baw.de/publikationen/tc213/0/b_8.pdf

HELENE, L.P.I.; MOREIRA, C.A.; CARRAZZA L.P. Applied Geophysics on a soil contaminated site by chromium of a tannery in Motica (SP, Brazil**) Revista Brasileira de Geofísica**, v.34, n. 3, p. 309-317, 2016. Disponível em https://sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/825

HUNTER J. A. & DOUMA, M. Development of a capacitive-coupled resistivity method for permafrost surveys in North America: Melinki Russkas (A little russian tale). **Fasttimes**, v.12, n.4. p. 23-26, 2007. Disponível em https://geometrics.com/wp-content/uploads/2018/10/seg2002.pdf

HYPOLITO R.; EZAKI S.; PÉREZ-AGUILAR A. (2010). Fluoreto nas águas subterrâneas dos aquíferos Tubarão e Cristalino, região de Salto-Indaiatuba (SP) **Revista Escola de Minas**, v.63, n.4, p. 715-726, 2010. Disponível em https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000400018

IAKUBOVSKII, I. V. & LIAJOV, L. L. **Exploración Eléctrica.** 3 ed. Barcelona, Espanha. Editora Reverté, 421p, 1980. ISBN 84-291-4614-8

INAZAKI T.; KISANUKI H.; OKAZAKI K.; YAMAZAKI S.; KURAHASHI T. Combined geophysical survey for characterizing bedrocks of a road tunnel. **Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems - SAGEEP.** Denver, Colorado, EUA, 5p, 2017. Disponível em https://www.academia.edu/47513831

INOKUCHI H. & AKAMATU H. Electrical conductivity of organic semiconductors. **Solid State Physics**, Editora Elsevier, v.12, p. 93-148, 1961. https://doi.org/10.1016/S0081-1947(08)60653-0

IRIS INSTRUMENT. **Catálogo técnico de apresentação do sistema de resistividade elétrica rasa modelo Corim**. França. 2p, 2002. Disponível em http://www.innopave.com/en/download/CORIM_GB.pdf. Acessado em 18/10/2019.

JOSÉ, C., & ELLERT, N. Abordagem geofísica para o mapeamento e monitoramento da pluma de contaminação na área de influência de um aterro sanitário urbano. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.7 n.1, 1989. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.317.sbgf207

KALINSKI, M.E.& SRIPADA, R.S. **Application of electromagnetic geophysics (EMG) technology to subsurface investigations. Final Report.** Wisconsin Highway Research Program n.0092-04-08, 51p, 2005. Disponível em https://minds.wisconsin.edu/handle/1793/54018

KAMINSKIY, A.E. **ZondRes2D. Two-dimensional DC resistivity and IP methods interpretation software**. Zond Geophysical Software, Saint-Petersburg, p. 18-62, 2010.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração.** Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. 1ª Reimpressão. Editora Oficina do Texto, São Paulo-SP, 438p, 2013. ISBN 978-85-86238-91-8

KISANUKI H.; OGAHARA T.; ONISHI K., INAZAKI T. Near surface geophysical survey at a collapsed site of a highway embankment caused by a heavy rainfall. **Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems - SAGEEP**, Denver, Colorado, EUA, p. 248-254, 2017. https://doi.org/:10.4133/SAGEEP.30-020

KIST L. T.; ROSA, F.R.; MORAES, J. A.R. & Machado, E. L. Diagnosis of hospital waste management in Vale do Rio Pardo, Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (GEAS)**, v.7, n.3, p. 554-569, 2018. Disponível em https://www.redalyc.org/journal/4716/471659747012/

KRESS W.H. & TEEPLE A.P. **Two-dimensional resistivity investigation of the North Cavalcade Street site, Houston, Texas. August, 2003.** U.S. Geological Survey, 34p, 2005. Disponível em https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5205/pdf/sir2005-5205.pdf

KURAS O. **The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface.** Tese de Doutorado. Universidade de Nottingham, Inglaterra. 286p, 2002. Disponível em http://eprints.nottingham.ac.uk/10171/1/PhD_Kuras_Oliver_2002.pdf. Acesso em 16/01/2022.

KURAS O.; BEAMISH, D.; MELDRUM P. I.; OGILVY R.D. Fundamentals of the capacitive resistivity technique. **Geophysics**, v.71, n.3, p. G135–G152, 2006. https://doi.org/10.1190/1.2194892. Acesso em 08/12/2021.

KURAS O.; MELDRUM P. I; BEAMISH, D.; OGILVY R.D.; LALA D. Capacitive resistivity imaging with towed arrays. **Journal of Environmental and Engineering Geophysycs.** v.12, p.267-279, 2007. DOI:10.2113/JEEG12.3.267

LASMAR, F. **Utilização de métodos geoelétricos para a identificação de corpos de barita na região do Vale do Ribeira.** Dissertação de Mestrado em Geofísica. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. 75p, 2020. Disponível em https://doi.org/10.11606/D.14.2020.tde-22012021-152302

LIMA, O.A.L. & SATO H.K. Detecção da contaminação de águas subterrâneas usando técnicas de Eletrorresistividade. **Anais do Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf)**, Rio de Janeiro-RJ, p. 410-420, 1993.

LIMA, S.D.; OLIVEIRA, A.F.; GOLIN, R.; CAIXETA, D.S.; LIMA, Z.M.; Morais, E.B. Gerenciamento de áreas contaminadas por postos de combustíveis em Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. **Revista Ambiente & Água***,* v.12, n.2, p. 299-315, 2017. Disponível em https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1872

LOKE, M.H. Res2Dinv, 3.54 version, for Windows 98/Me/2000/NT/XP. **Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-squares method**. Software Manual, 133p, 2004.

MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A.C.O.; DOURADO, J.C.; LOURENÇO JÚNIOR, J.C.R. Emprego de métodos geofísicos na caracterização e análise ambiental do aterro sanitário de Jundiaí SP. **Revista de Geociências**, v. 19, n.1, p. 123-132, 2000.

MARTORANA R; LOMBARDO L.; MESSINA N.; LUZIO, D. Integrated geophysical survey for 3D modelling of a coastal aquifer polluted by seawater. **Near Surface Geophysics**, v. 12, p. 45-59, 2014. DOI: 10.3997/1873-0604.2013006

McNEILL, J. **Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers.** Technical Note*,* n.6, p. 5–15, 1980. Disponível em http://www.geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn6.pdf

MENDES, J.M.B. **Técnicas geofísicas aplicadas ao mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas.** Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 207p, 1987. DOI: 10.11606/T.44.1987.tde-16072015-144127.
Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44131/tde-16072015-144127/publico/Mendes_Doutorado.pdf

MENDES, J.M.B., PACHECO, A., & HASSUDA, S. Cemitérios e meio ambiente: a geofísica como método auxiliar na avaliação de sua influência nas águas subterrâneas. **Anais do Encontro Nacional de Estudos Sobre O Meio Ambiente - UFSC**, v.1 (2), p. 50-57, 1989.

MEPAIYEDA, S.; BAIYEGUNHI, C.; MADI, K.; GWAVAVA, O. A geophysical and hydro physico-chemical study of the contaminant impact of a solid waste landfill (swl) in King Williams' Town, Eastern Cape, South Africa. **Open Geosciences**, v.11, p.549-557, 2019. https://doi.org/10.1515/geo-2019-0045

MILSOM, J. **Field geophysics**, 3ª Edição. John Wiley & Sons Editores. West Sussex, England, 232p, 2003. ISBN 0-470-84347-0

MOREIRA C.A., AQUINO W.F., DOURADO J.C. Aplicação do método Eletromagnético Indutivo (EM) no monitoramento de contaminantes em subsuperfície. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.25(4). pp 413-420, 2007. Disponível em https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000400005

MOREIRA, C.A. & BRAGA. A.C.O. Caracterização geoelétrica de contaminantes provenientes da decomposição de resíduos sólidos domiciliares. **Revista Ambiente**

e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science. v.4, n.2. p. 106-114, 2009. Disponível em https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92811747010

MOREIRA, C.A.; BORTOLIN, J.R.M.; MALAGUTTI FILHO; W.; DOURADO, J.C. Alterations in electrical resistivity of sandy soil in controlled experiment by infiltration of stillage. **Revista Geociências**, v. 38, n. 1. P. 147-156, 2019. Disponível em https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i1.12697

NAKAZAWA H., SUGANO T., KOHAMA E. Case Studies on Evaluation of Liquefaction Resistance in terms of Combination of Surface Wave Exploration and Electrical Prospecting. **Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering**. Lisboa, Portugal. 10p, 2012. Disponível em https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2033.pdf.

NOBES, D.C. Troubled waters: environmental applications of electrical and electromagnetic methods. **Surveys in Geophysics**, v.17, p. 393-454, 1996. Disponível em http://www.mtnet.info/division/papers/EMWKSHP_ReviewVolumes/1994Brest/Nobes_1994BrestReview_SG_1996.pdf

NOBES, D.C.; ARMSTRONG, M.J.; BROADBENT, M. Delineation of a landfill leachate plume using shallow electromagnetic and ground penetrating radar surveys. **Expanded Abstracts of Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists**, p. 566-568, 1994. https://doi.org/10.1190/1.1932161

NGUYEN F., KEMNA A., ANTONSSON A., ENGESGAARD P., KURAS O., OGILVY R., GISBERT J., JORRETO S., PULIDO-BOSCH A. Characterization of seawater intrusion using 2D electrical imaging. **Near Surface Geophysics**. n. 7, p. 3-16, 2009. Disponível em https://www.academia.edu/19282354/Characterization_of_seawater_intrusion_using_2D_electrical_imaging

OLDENBORGER G.A., LEBLANC A. Capacitive resistivity inversion using effective dipole lengths for line antennas. **Journal of Applied Geophysics**. Elsevier. n 98. p 229–236, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.09.003

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE - OMS. Population health and waste management: scientific data and policy options. **Report of a WHO Workshop Rome, Italy**. WHO Regional Office for Europe, p. 29-30, 2007. Disponível em https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0012/91101/E91021.pdf

OSINOWO O.O. & FALUFOSI, M.O. 3D Electrical Resistivity Imaging (ERI) for subsurface evaluation in preengineering construction site investigation. **Journal of Astronomy and Geophysics.** v.7, p. 309-317, 2018. Disponível em https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.nrjag.2018.07.001

OYINKURO, O.A.; WARIEBI, K.A. Hydrocarbon spill site characterization by electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar Methods - a review. **Asian Journal of Environment & Ecology**. v.4, n.3, p.1-9, 2017. Disponível em

https://www.academia.edu/34871737

PACHECO A. **Meio Ambiente & Cemitérios**. 1 Ed. Editora Senac. São Paulo-SP. 191p, 2012. ISBN 978-85-396-0256-8

PALACKY, G. Resistivity Characteristics of Geological Targets. In: Nabighian, M., Ed., **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory**, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa-OK, p. 53-129, 1988. https://doi.org/10.1190/1.9781560802631.ch3

PARASNIS D.S. **Principles of Applied Geophysics**. 5 ed., Chapman & Hall Editores, London, 429p, 1997. ISBN 0-412-80250-3

PELLERIN, L. & GROOM, D. Characterization of an old diesel fuel spill? Results of a multi-receiver OhmMapper survey. **Proceedings of 73rd Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysics**, Dallas, Texas, 4p, 2003. Disponível em https://www.academia.edu/5884343/

PIRES, F.R.M. **Urânio no Brasil: geologia, jazidas e ocorrências**. Eletrobrás, Eletronuclear. 1ª Edição. Rio de Janeiro-RJ, 299p, 2013. Disponível em https://www.academia.edu/7828249/

PLIVA, G.L. & WONG, J. **Case Histories in the Application of Geophysics to Ground Water Problems**. Ministério do Meio Ambiente, Ontário, Canadá, p. 39-52, 1975. Disponível em https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/15660/OME_case_hist_geophysics_groundwater_75.pdf?sequence=1&isAllowed=y

R&D MINERAÇÃO E CONSTRUÇÃO. **Boletins de descrição geológica de sondagens executadas no município de Caetité, BA.** 51p, 2017.

REBOUÇAS, A.C. Estágio atual dos conhecimentos sobre as águas subterrâneas do Brasil. **Revista Brasileira de Águas Subterrâneas** - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. v.2, n.1, 12p, 1980. Disponível em https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/11116/7559

REVIL, A.; SKOLD, M.; KARAOULIS, M.; SCHMUTZ, M.; HUBBARD, S.S.; MEHLHORN, T. L; WATSON, D. B. Hydrogeophysical investigations of the former S-3 ponds contaminant plumes, Oak Ridge Integrated Field Research Challenge site, Tennessee. **Geophysics**, v.78, n.4, p. EN29–EN41, 2013. https://doi.org/10.1190/geo2012-0177.1

REYNOLDS, J.M. **An introduction to applied and environmental geophysics**, 2ª Edição, Wiley-Blackwell Editores. Oxford, 696p, 2011. ISBN 978-0-471-48535-3.

SALINAS, V. C. F. Contaminação do solo em São Paulo: O caso da operação urbana Bairros do Tamanduateí. **Revista Labverde**, v.1, n.10, p. 84-102. 2015. https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.v1i10p84-102

SARAIVA F.A. **Avaliação de métodos geofísicos no comportamento espacial de plumas de necrochorume.** Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 136p, 2010. Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-26072011-155842/pt-br.php

SÃO PAULO (Estado) **Lei nº 13.577, de 08 de julho de 2009** – Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas. Disponível em www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13577-08.07.2009.html.

SILVA, F.C. **Avaliação de metais potencialmente tóxicos em zona não saturada da necrópole de Nossa Senhora Aparecida, Piedade, SP**. Tese de Doutorado em Ciências Ambientais. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba. Sorocaba. 249p, 2018. Disponível em https://repositorio.unesp.br/handle/11449/157391. Acesso em 04/01/2022.

SILVA, R.W.C. & MALAGUTTI FILHO, W. O emprego de métodos geofísicos na fase de investigação confirmatória em cemitérios contaminados. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.14, n.3, p.327-336, 2009. Disponível em https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000300006

SOUZA E.L., DAMASCENO, F., SCHIRMER G.K., RAMIRES M.F., BISOGNIN R.P., BOHRER. R.E.G., VASCONCELOS M.C.; CEZIMBRA J.C.G. Resíduos contaminantes no solo: possibilidades e consequências. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental***,* Florianópolis, v.7 (2), 484-509, 2018. Disponível em https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e22018484-509

SAYRE, A.N. AND E.L. STEPHENSON. The use of resistivity methods in the location of saltwater bodies in the El Paso, Texas Area. **Transactions American Geophysical Union**, v.18, p. 393-398, 1937.

SHIMA, H.; SAKASHITA, S.; KOBAYASHI, T. Developments of non-contact data acquisition techniques in electrical and electromagnetic explorations. **Journal of Applied Geophysics**, v. 35, p. 167-173, 1996. https://doi.org/10.1016/0926-9851(96)00018-3

SHIRAIWA, S., LISOVSKY S.P., ELIS, V.R., PORSANI, J.L., BORGES, W.R. Estudos geofísicos integrados no Lixão de Cuiabá-MT, Brasil. Resultados preliminares. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20, n. 3, p. 181-186, 2002. Disponível em https://doi.org/10.1590/S0102-261X2002000300004

STEEPLES, D. Uses and techniques of environmental geophysics. **Geophysics: The Leading Edge**, v.10, p. 30-31, 1991. https://doi.org/10.1190/1.1436839

SWARTZ, J.H. Resistivity studies of some salt-water boundaries in the hawaiian islands. **Transactions American Geophysical Union**, v.18, p. 387-393, 1937. https://doi.org/10.1029/TR018i002p00387

SWARTZ, J.H. Geophysical investigations in the hawaiian islands, **Transactions American Geophysical Union**, v. 20, p. 292-298, 1939. https://doi.org/10.1029/TR020i003p00292

TIMOFEEV, V. M.; ROGOZINSKI, A. W.; HUNTER, J. A.; DOUMA, M., A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics. **Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP),** Environmental and Engineering Geophysical Society, p. 701–715, 1994. https://doi.org/10.4133/1.2922099

TRANI, P.E.; TIVELLI S.W.; CARRIJO O.A. Fertirrigação em hortaliças. **Boletim Técnico IAC**. 2ª Edição. Instituto Agronômico de Campinas, n. 196, 51p, 2011. Disponível em https://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/arquivos/iacbt1962ed.pdf

WALKER, J.P. & HOUSER, P.R. Evaluation of the OhmMapper Instrument for Soil Moisture Measurement. **Soil Science Society of America Journal**, v.66. p 728–734, 2002. Disponível em https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.488.1887&rep=rep1&type=pdf

WARNER, D.L. Preliminary field studies using earth resistivity measurements for delineating zones of contaminated groundwater. **Ground Water**, v. 7, p. 9-16, 1969. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1969.tb01262.x

XAVIER, F.V. **Métodos Geoelétricos Aplicados ao diagnóstico Ambiental Subsuperficial do Cemitério Municipal de Rio Claro, SP**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro-SP, 158p, 2015. Disponível em https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/132869/000855625.pdf?sequence=1&isAllowed=y

YAMASHITA, Y.; GROOM D.; INAZAKI T., HAYASHI K. Rapid near surface resistivity survey using the capacitively-coupled resistivity system: OhmMapper. **Proceedings of 7th International Symposium of Society of Exploration Geophysicists of Japan (SEGJ)**, Sendai, Japão, p. 292-295, 2004. Disponível em https://www.academia.edu/3277011/

ZOSSI B.; FAGRE M..; AMIT, H.; ELIAS A.G. Geomagnetic field model indicates shrinking northern auroral oval. **JGR Space Physics**. American Geophysical Union. v.125, 21p, 2020. https://doi.org/10.1029/2019JA027434.

APÊNDICE

Tabela de parâmetros de aquisição de dados dos perfis de Resistividade Capacitiva realizados na área de mineração (comprimento individual de 300 m).

Arquivo	Seção	Número de leituras	Espaçamento entre medidas (m)	Horário inicial (h:m:s)	Horário final (h:m:s)	Intervalo de tempo (h:m:s)
1	1	267	1,12	9:59:16	10:06:10	0:06:54
2	2	253	1,19	10:07:39	10:11:52	0:04:13
3	3	250	1,20	10:16:23	10:21:14	0:04:51
4	4	250	1,20	10:22:42	10:26:51	0:04:09
5	5	261	1,15	11:02:39	11:07:41	0:05:02
6	6	264	1,14	11:10:42	11:15:06	0:04:24
7	7	259	1,16	11:16:36	11:20:54	0:04:18
8	8	260	1,15	11:22:32	11:26:51	0:04:19
9	9	294	1,02	13:36:18	13:41:10	0:04:52
10	10	275	1,09	13:43:23	13:47:58	0:04:35
11	11	289	1,04	15:17:47	15:22:35	0:04:48
12	12	259	1,16	15:24:18	15:28:37	0:04:19
13	13	262	1,15	15:29:35	15:33:54	0:04:19
14	14	262	1,15	15:34:51	15:39:35	0:04:44
15	15	241	1,24	15:40:37	15:44:38	0:04:01
16	16	241	1,24	15:45:38	15:49:39	0:04:01
17	17	221	1,36	15:50:41	15:54:22	0:03:41
18	18	237	1,27	15:55:00	15:58:56	0:03:56
19	19	237	1,27	15:59:52	16:03:48	0:03:56
20	20	262	1,15	16:04:56	16:09:22	0:04:26
21	21	248	1,21	16:10:29	16:14:38	0:04:09
22	22	250	1,20	16:15:12	16:20:00	0:04:48
23	1	228	1,32	16:20:18	16:24:06	0:03:48
24	2	254	1,18	8:35:56	8:41:23	0:05:27
25	3	233	1,29	8:42:31	8:46:25	0:03:54
26	4	219	1,37	8:47:32	8:51:10	0:03:38
27	5	256	1,17	8:51:53	8:56:09	0:04:16
28	6	235	1,28	8:56:51	9:00:45	0:03:54
29	7	238	1,26	9:02:13	9:06:10	0:03:57
30	8	235	1,28	9:07:16	9:11:10	0:03:54
31	9	237	1,27	9:11:57	9:15:54	0:03:57
32	10	233	1,29	9:16:53	9:20:46	0:03:53
33	11	222	1,35	9:21:55	9:25:36	0:03:41
34	12	234	1,28	12:53:57	12:57:51	0:03:54
35	13	217	1,38	12:58:45	13:02:21	0:03:36
36	14	218	1,38	13:03:23	13:07:00	0:03:37
37	15	190	1,58	13:13:28	13:16:37	0:03:09
38	16	182	1,65	13:17:24	13:20:25	0:03:01
39	17	185	1,62	13:21:04	13:24:09	0:03:05

40	18	183	1,64	13:24:46	13:27:48	0:03:02
41	19	192	1,56	13:30:23	13:33:34	0:03:11
42	20	194	1,55	13:34:31	13:37:44	0:03:13
43	21	193	1,55	13:38:20	13:41:32	0:03:12
44	22	187	1,60	13:42:10	13:45:16	0:03:06
45	1	246	1,22	8:34:54	8:38:59	0:04:05
46	2	258	1,16	8:40:21	8:44:58	0:04:37
47	3	266	1,13	8:46:14	8:50:58	0:04:44
48	4	258	1,16	8:52:19	8:57:22	0:05:03
49	5	235	1,28	9:00:34	9:04:40	0:04:06
50	6	254	1,18	9:08:32	9:12:45	0:04:13
51	7	285	1,05	9:17:22	9:22:42	0:05:20
52	8	286	1,05	9:23:44	9:29:00	0:05:16
53	9	229	1,31	9:31:51	9:35:39	0:03:48
54	10	217	1,38	9:36:46	9:40:22	0:03:36
55	11	206	1,46	9:41:07	9:45:11	0:04:04
56	12	229	1,31	9:45:57	9:56:59	0:11:02
57	13	197	1,52	9:57:51	10:01:07	0:03:16
58	14	190	1,58	10:02:06	10:05:15	0:03:09
59	15	192	1,56	10:05:48	10:09:13	0:03:25
60	16	186	1,61	10:09:50	10:12:55	0:03:05
61	17	217	1,38	10:13:37	10:20:49	0:07:12
62	18	196	1,53	10:21:25	10:24:41	0:03:16
63	19	210	1,43	10:25:30	10:28:59	0:03:29
64	20	210	1,43	10:29:49	10:33:18	0:03:29
65	21	200	1,50	10:33:47	10:37:06	0:03:19
66	22	202	1,49	10:37:38	10:40:59	0:03:21
Médias		**233,0**	**1,31**			**0:04:11**

Fonte: Dados da pesquisa.