

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

ROBERTA LAYRA FARAGÓ JARDIM

**Caracterização de áreas utilizadas para disposição de resíduos com o apoio de métodos  
geofísicos**

São Paulo  
2023

**ROBERTA LAYRA FARAGÓ JARDIM**

**Caracterização de áreas utilizadas para disposição de resíduos com o apoio de métodos geofísicos**

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

Área de Concentração: Geofísica

Orientador: Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

São Paulo  
2023

## FOLHA DE AVALIAÇÃO

Nome: JARDIM, Roberta Layra Faragó

Título: Caracterização de áreas utilizadas para disposição de resíduos com apoio de métodos geofísicos

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

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana seja apenas outra alma humana.”

Carl G. Jung

*Dedico aos meus pais e meu companheiro*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

Aos meus pais Deborah e Gastão e ao irmão Igor, pelo amor e apoio irrestrito.

Aos familiares por todo suporte e compreensão.

Ao meu companheiro de vida, Thiago.

Aos amigos por toda paciência e suporte ao longo desta jornada. Em especial, à amiga Marina Fernandes pelos diversos auxílios ao longo do desenvolvimento da dissertação.

Ao orientador Dr. Vagner Roberto Elis pelos ensinamentos, motivação e pela confiança em mim depositada para elaboração deste trabalho.

Aos professores da graduação por todo apoio e incentivo.

Aos professores do mestrado pelos conhecimentos transmitidos.

À Universidade de São Paulo (USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pelo financiamento por meio da bolsa de mestrado.

## RESUMO NA LÍNGUA VERNÁCULA

JARDIM, R. L. F. **Caracterização de áreas utilizadas para disposição de resíduos com o apoio de métodos geofísicos.** 2023. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

O aumento da geração de resíduos sólidos urbanos, observado ao longo dos anos, tem suscitado discussões importantes a respeito da forma como eles são dispostos. Quando realizados em lixões e aterros controlados, a contaminação de solos e águas subterrâneas torna-se provável. Quando dispostos em aterros sanitários, um projeto adequado às normas vigentes e monitoramento constante pode evitar a ocorrência de problemas ambientais. Métodos geofísicos vêm sendo utilizados na caracterização do subsolo e monitoramento de contaminantes, principalmente os métodos geoeletricos, mostrando-se eficientes e menos custosos. Estes métodos indiretos permitem uma avaliação bidimensional mais completa do subsolo, o que é inviável em sondagens diretas. Desta forma, este trabalho teve por objetivo demonstrar a aplicabilidade dos métodos geoeletricos da eletrorresistividade e polarização induzida na caracterização de áreas de disposição de resíduos sólidos, antes e após a instalação de aterros e lixões. Foram estudadas duas áreas de disposição de resíduos, ambas localizadas na cidade de São Carlos: o antigo lixão da cidade, cujas atividades se encerraram em 1996, e o atual aterro sanitário, ainda em fase de investigação à época dos ensaios geofísicos. Foram realizadas linhas de caminhamento elétrico com arranjo do tipo dipolo-dipolo, investigando as propriedades físicas resistividade e cargabilidade. Os resultados atestaram o potencial dos métodos geoeletricos, tanto na identificação do topo da rocha diabásio, na área investigada para instalação do aterro, quanto na identificação de contaminantes na região do lixão. O topo do diabásio foi delimitado a partir dos perfis de resistividade, para valores superiores a 346 ohm.m, e os perfis de cargabilidade foram empregados como método auxiliar de validação dos resultados, com valores crescentes com a profundidade e resistividade. A contaminação na região do lixão foi verificada em valores de resistividade menores que 27 ohm.m, caracterizando altos valores de cargabilidade na região dos resíduos e percolados.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos, Eletrorresistividade, Polarização Induzida, Contaminação.

## ABSTRACT

JARDIM, R. L. F. **Characterization of waste disposal areas with the support of geophysical methods.** 2023. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

The increase in the generation of domestic solid waste, observed over the years, has raised important discussions regarding the way they are disposed. When carried out in open dumps, contamination of soils and groundwater becomes likely. When disposed of in sanitary landfills, following current regulations and carrying out constant monitoring can prevent the occurrence of environmental problems. Geophysical methods have been used in subsurface characterization and monitoring of contaminants. Geoelectric methods have been shown to be efficient and less costly. These indirect methods allow a more complete two-dimensional assessment of the subsurface, which is unfeasible in direct drilling. Thus, this work aimed to study the applicability of the geoelectric methods of electrical resistivity and induced polarization to characterize the solid waste disposal areas, before and after the installation of landfills and open dumps. Two waste disposal areas were selected, both located in the city of São Carlos. The first one is an old open dump, whose activities ended in 1996, and the other one is a sanitary landfill, which were in the preliminary investigation phase when the geophysical tests were made. Electrical Resistivity Imaging using dipole-dipole array were used to investigate the resistivity and chargeability properties. The results attested to the potential of geoelectric methods. They were capable to identify the top of the diabase rock in the area of the sanitary landfill, and to identify the contaminants in the region of the open dump. The top of the diabase was delimited from the resistivity profiles, for values greater than 346 ohm.m. The chargeability profiles were used as an auxiliary method for validating the results, with values increasing with depth and resistivity. The contamination in the open dump area was verified at resistivity values lower than 27 ohm.m, characterizing high chargeability values in the waste and leachate region.

**Keywords: Solid Waste, Electrical Resistivity, Induced Polarization, Contamination.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo dos equipamentos utilizados num ensaio SPT .....	21
Figura 2 - Cilindro ideal .....	31
Figura 3 – Fluxo de corrente numa terra homogênea, considerando um semi-espaço.....	31
Figura 4 - Configuração usual dos arranjos de eletrodos em campo.....	32
Figura 5 - Variação do potencial ( $\Delta V$ ) com o tempo, onde a linha pontilhada vertical indica o momento em que a corrente é interrompida .....	35
Figura 6 - Polarização de membrana após aplicação de um campo elétrico, associado (A) a uma constrição dos poros e (B) à presença de partículas de argila .....	37
Figura 7 - Polarização eletrônica após aplicação de um campo elétrico, para (A) fluxo irrestrito e (B) com grão polarizado bloqueando a passagem. ....	38
Figura 8 - Esquema do arranjo Wenner, com dois eletrodos de corrente posicionados nas extremidades e dois eletrodos de potencial no centro. ....	39
Figura 9 - Esquema do arranjo Schlumberger, com dois eletrodos de corrente posicionados nas extremidades e dois eletrodos de potencial ao centro.....	39
Figura 10 - Esquema do arranjo dipolo-dipolo, com dois eletrodos de corrente posicionados à esquerda e dois eletrodos de potencial à direita .....	40
Figura 11 – Algoritmo básico da rotina de inversão de dados .....	42
Figura 12 - Mapa geológico com as principais formações no município de São Carlos .....	45
Figura 13 - Mapa de localização do aterro sanitário de São Carlos .....	49
Figura 14 - Mapa geológico da área onde foi instalado o aterro sanitário .....	50
Figura 15 - Mapa de localização do lixão desativado de São Carlos .....	51
Figura 16 - Mapa geológico da área onde foi instalado o lixão .....	52
Figura 17 – Esquema de utilização do equipamento Syscal Pro, com conversor e bateria, empregado no levantamento das linhas de caminhamento elétrico.....	54
Figura 18 - Localização das linhas de caminhamento elétrico no aterro sanitário, e informações complementares .....	55
Figura 19 - Localizações das linhas de caminhamento elétrico no lixão e dos poços de monitoramento.....	59



Figura 20 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha G, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	63
Figura 21 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha G, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	63
Figura 22 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha F, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	64
Figura 23 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha F, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	64
Figura 24 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha D, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	65
Figura 25 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha D, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	65
Figura 26 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha C, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	66
Figura 27 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha C, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	66
Figura 28 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha B, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	67
Figura 29 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha B, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	67
Figura 30 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha A, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	68
Figura 31 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha A, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	68
Figura 32 - Localização das sondagens SPT, à esquerda (a), e mapa do impenetrável, à direita (b) .....	70
Figura 33 - Localização dos pontos identificados a partir das linhas de resistividade, à esquerda (a), e mapa de topo da rocha diabásio, à direita (b).....	72
Figura 34 - Modelo de elevação do topo rochoso .....	73
Figura 35 - Localização dos pontos identificados a partir das linhas de resistividade e sondagens SPT, à esquerda (a), e mapa de topo da rocha diabásio, à direita (b).....	74
Figura 36 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 0, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	77

Figura 37 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 0, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	78
Figura 38 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 1, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	79
Figura 39 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 1, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	79
Figura 40 – Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 2, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	80
Figura 41 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 2, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	81
Figura 42 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 3, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	82
Figura 43 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 3, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	82
Figura 44 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 4, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	83
Figura 45 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 4, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	83
Figura 46 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 5, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	84
Figura 47 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 5, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.....	84

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Faixa de valores de resistividade para sedimentos, rochas e águas.....	34
Tabela 2 - Coordenadas UTM da localização das sondagens SPT e resultados da profundidade do impenetrável .....	56
Tabela 3 - Coordenadas UTM das localizações dos topos do diabásio segundo as linhas de caminamento elétrico e resultados das profundidades identificadas do topo da rocha .....	71
Tabela 4 – Dados utilizados para obter o mapa de profundidade do diabásio .....	107

## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**Abrelpe** – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

**CE** – Caminhamento Elétrico

**ER** – Eletrorresistividade

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IP** – Induced Polarization (Polarização Induzida)

**NBR** – Norma Brasileira

**PMGIRS** – Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos

**RIMA** – Relatório de Impacto Ambiental

**RMS** – Root Mean Square

**RSU** – Resíduo Sólido Urbano

**SPT** – Standard Penetration Test

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1. Objetivo .....	18
<b>2. RESÍDUOS SÓLIDOS .....</b>	<b>19</b>
2.1. Meio de disposição de resíduos ambientalmente adequado .....	19
2.2. Critérios Para Seleção de Áreas para Instalação de Aterro Sanitário .....	20
2.2.1. Sondagem à Percussão (SPT).....	20
2.3. Dados gerais sobre geração e disposição de resíduos sólidos .....	22
2.4. Impactos Ambientais e Saúde Humana .....	25
2.5. Aplicações da Geofísica.....	26
<b>3. MÉTODOS GEOFÍSICOS.....</b>	<b>29</b>
3.1. Eletrorresistividade .....	30
3.2. Método de Polarização Induzida (IP) .....	34
3.2.1. Polarização Eletrolítica .....	36
3.2.2. Polarização Metálica.....	37
3.3. Arranjo de eletrodos.....	38
3.4. Inversão Geofísica .....	40
3.4.1. Método da Inversão .....	41
<b>4. ÁREAS DE ESTUDO .....</b>	<b>44</b>
4.1. Caracterização da região .....	44
4.1.1. Formação Pirambóia.....	45

4.1.2.	Formação Botucatu .....	46
4.1.3.	Formação Serra Geral .....	47
4.1.4.	Grupo Bauru (Formação Itaqueri) .....	47
4.1.5.	Abastecimento hídrico da região.....	48
<b>4.2.</b>	<b>Aterro Sanitário de São Carlos.....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.</b>	<b>Lixão desativado de São Carlos .....</b>	<b>50</b>
<b>5.</b>	<b>AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS EM CAMPO .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1.</b>	<b>Aterro Sanitário de São Carlos.....</b>	<b>54</b>
5.1.1.	Caminhamento Elétrico .....	55
5.1.2.	Ensaio de Campo – Sondagem SPT .....	56
5.1.3.	Elaboração de mapas de profundidade com auxílio do software Surfer.....	57
<b>5.2.</b>	<b>Lixão Desativado de São Carlos .....</b>	<b>58</b>
5.2.1.	Caminhamento Elétrico .....	58
<b>5.3.</b>	<b>Interpretação e processamento dos dados obtidos em campo .....</b>	<b>59</b>
5.3.1.	Software RES2DINV .....	60
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>6.1.</b>	<b>Aterro Sanitário de São Carlos.....</b>	<b>61</b>
6.1.1.	Conclusões sobre as interpretações das seções do Aterro Sanitário .....	69
6.1.2.	Mapa de profundidade do impenetrável .....	70
6.1.3.	Mapa do topo rochoso a partir dos caminhamentos elétricos .....	71
6.1.4.	Mapa do topo rochoso a partir das sondagens SPT e geoeletricas .....	73

6.1.5.	Conclusões sobre os mapas elaborados .....	75
<b>6.2.</b>	<b>Lixão desativado de São Carlos .....</b>	<b>76</b>
6.2.1.	Considerações sobre as interpretações das seções do Lixão .....	84
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>86</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
	ANEXO I - Seções de resistividade e cargabilidade das linhas de caminhamento elétrico ....	96
	ANEXO II - Dados compilados das sondagens SPT e ensaios geoeletricos, usados para gerar o mapa de topo do diabásio da Figura 35 .....	106

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da urbanização vem gerando um crescimento na produção de resíduos industriais e urbanos dos mais variados tipos. São materiais, substâncias ou objetos derivados de atividades humanas, de diversas origens, cujo destino não pode ser o lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água (ABNT, 2004; BRASIL, 2010). Via de regra, quando oriundos do aglomerado urbano, são chamados resíduos sólidos urbanos (RSU) (ABNT, 1992).

Segundos dados do Panorama dos resíduos sólidos no Brasil (ABRELPE, 2022), em 2022 foram gerados cerca de 81,8 milhões de toneladas de RSU no país, que correspondem a uma geração per capita de 1,043 kg/hab/dia. Destes, 93% foram coletados e enviados a aterros sanitários, aterros controlados ou lixões. Cerca de 61% destes RSU foram enviados a aterros sanitários, o que corresponde a 46,4 milhões de toneladas sendo enviados ao único sistema ambientalmente adequado de disposição de resíduos. Os demais 39% foram enviados a destinações ambientalmente inadequadas, o que corresponde a 29,7 milhões de toneladas de resíduos sendo enviados a aterros controlados e lixões.

Apesar do Brasil ter capacidade de reciclar e compostar até 76% do volume de resíduos urbanos gerados (BRASIL, 2020a), o país ainda está aquém da média mundial, em que aproximadamente 37% do montante de resíduos sólidos produzidos no mundo são dispostos em aterros, 33% em lixões, 19% são enviados à compostagem e reciclagem e 11% à incineração (KAZA et al., 2018). Estes dados estão intrinsecamente relacionados ao aumento do volume de resíduos que são enviados a aterros e lixões, à busca por novas áreas para instalação destes empreendimentos e aos possíveis impactos ambientais provenientes desta disposição final.

Com a crescente preocupação com a preservação ambiental e saúde da população, vêm sendo amplamente discutidas uma série de medidas que têm por objetivo tratar os resíduos urbanos de forma a minimizar seus efeitos indesejáveis no meio físico. Esse conjunto de medidas é atualmente denominado de sistema de gerenciamento de resíduos urbanos, que visa dar um tratamento adequado ao lixo desde sua origem até o aterro sanitário, controlando e monitorando esse aterro para que riscos de contaminação sejam mínimos (IBGE, 2011). A implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, em 2010, e a sanção do Marco do Saneamento, em 2020, fazem parte desta política de tratamento de resíduos.



Dentro desse sistema é fundamental que em cada etapa os resíduos sejam tratados adequadamente, obedecendo a técnicas especialmente desenvolvidas. A NBR 8.419 (ABNT, 1992) direciona o profissional responsável quanto aos critérios que devem ser seguidos na implementação de um aterro sanitário. Os ambientes geológico, geotécnico e hidrogeológico devem ser favoráveis à construção e operação de aterros sanitários. Além disso, a norma NBR 13.896 (ABNT, 1997) determina que o monitoramento de aterros e das águas subterrâneas deve continuar durante sua vida útil, incluindo o tempo de pós-fechamento. Estas etapas finais também são importantes pois, ainda que sejam obedecidas as normas vigentes para construção de aterros, não é possível assegurar que eventualidades não ocorrerão.

Os resíduos sólidos compreendem uma extensa gama de substâncias químicas e a disposição desses resíduos, de forma inadequada ou não, pode apresentar potencial nocivo ao meio ambiente e saúde humana. A produção de metano pela ação de bactérias anaeróbias durante a decomposição da matéria orgânica contribui para as emissões de CH<sub>4</sub> nos resíduos sólidos (REGATTIERI, 2009). A presença de insetos vetores de doenças, principalmente em locais de disposição inadequada dos resíduos, pode causar problemas a população que reside próximo ao local e à sociedade como um todo (CORRÊA et al., 2011; QASIM et al., 2020).

Outro problema comum diz respeito à existência de líquidos contendo substâncias contaminantes que podem infiltrar no subsolo e atingir as águas subterrâneas - comprometendo sua qualidade e podendo até inviabilizar seu uso, mesmo em aterros sanitários (JHAMNANI; SINGH, 2009; SHINZATO, 2014; SISINNO, 2003). A investigação de contaminação de solo e águas subterrâneas é habitualmente realizada a partir de métodos diretos, como sondagens SPT e instalação de poços, cujo objetivo é permitir uma observação direta do subsolo e suas propriedades.

Além das investigações tipicamente realizadas pelos métodos diretos, também podem ser empregados métodos indiretos no auxílio à caracterização de áreas de disposição de resíduos. Estas análises podem ser realizadas a partir do estudo do contraste de algumas propriedades físicas das estruturas ou corpos em relação ao meio que os circundam, ou seja, através da aplicação da Geofísica, obtendo-se propriedades físicas capazes de caracterizar os materiais de interesse. A NBR 8.419 (ABNT, 1992) também recomenda a realização de ensaios geofísicos nas investigações geológicas de área que se deseja instalar aterros sanitários.

Os métodos geofísicos são levantamentos não invasivos e não destrutivos, capazes de fornecer informações sobre a profundidade do nível d'água, estratigrafia do subsolo, caminhos preferenciais de água subterrânea, delimitar plumas de contaminantes, localizar valas de resíduos, dentre outros. Via de regra, são menos onerosos e permitem uma investigação horizontalizada do subsolo – limitação imposta pelos métodos diretos (BRAGA, 2016). Quando aliados aos métodos diretos, complementam e aperfeiçoam as investigações.

Diversos estudos relacionando técnicas geotécnicas e geofísicas, principalmente métodos geoeletricos, na avaliação e caracterização de locais para deposição de resíduos sólidos, vêm sendo realizados há décadas, visando otimizar o diagnóstico e acrescentar informações ao estudo. Os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida, ambos métodos geoeletricos, foram estudados por pesquisadores como Gallas, Taioli e Cruz (2006), Leroux e Dahlin (2007), Ustra (2008), Miura et al. (2013), Brahmi et al. (2021), e tantos outros. Os autores têm demonstrado a aplicabilidade dos métodos geoeletricos na identificação de plumas de contaminação no subsolo, da contaminação de águas subterrâneas, na determinação de espessuras da rocha e do solo, na identificação de camadas de resíduos. Em muitos destes trabalhos citados, também foram utilizadas informações de métodos de investigação direta das propriedades do solo para complementar os estudos. De maneira geral, os trabalhos têm reforçado as vantagens obtidas ao serem aplicados, de maneira adequada, os métodos geofísicos – em especial os métodos geoeletricos.

### **1.1. Objetivo**

Este trabalho tem por objetivo avaliar como a geofísica integrada aos métodos diretos pode melhorar a caracterização de locais de disposição de resíduos sólidos urbanos, antes da instalação de aterros, durante o funcionamento e no pós fechamento e monitoramento, utilizando para tal os métodos geoeletricos da eletrorresistividade e polarização induzida. Deseja-se mostrar que os métodos geoeletricos podem auxiliar na identificação de plumas de contaminação, quando já instalado um aterro ou lixão, e na indicação e delimitação de rochas em subsuperfície, quando deseja-se determinar a região de instalação de um aterro.

## **2. RESÍDUOS SÓLIDOS**

O crescimento populacional e consequente aumento nos hábitos de consumo tem estimulado a produção cada vez maior de bens e produtos, principalmente numa sociedade que investe cada vez mais em produtos que rapidamente se tornam obsoletos, indesejáveis e em sequência descartáveis (FRÉSCA, 2007). A consequência destes fatores é o aumento na geração de resíduos sólidos.

Resíduos sólidos são definidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) como o produto de “atividades de origem industrial, doméstica (domiciliar), hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição, assim como lodos e determinados líquidos, em que o lançamento na rede pública de esgoto ou corpos d’água seja inviável”. Uma vez gerados num aglomerado urbano, com exceção dos resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos, são classificados como resíduos sólidos urbanos (RSU) (ABNT, 1992). Quando esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação destes resíduos por processos tecnológicos viáveis, a disposição final ambientalmente correta deve ser aplicada e este resíduo. Segundo definição apresentada pela Lei n. 12.305 (2010), este resíduo, na fase final de disposição, é denominado rejeito.

### **2.1. Meio de disposição de resíduos ambientalmente adequado**

Embora, atualmente, em diferentes países, os resíduos sólidos sejam destinados a diversas unidades de disposição, principalmente aterros sanitários, aterros controlados e lixões (CHENITI, 2014; EUROSTAT, 2022; PHILIPPE; CULOT, 2009), apenas a primeira alternativa é a forma mais adequada de disposição final dos rejeitos. A ABNT NBR 8.419 (1992) define os aterros sanitários como técnica de disposição de RSU que minimiza impactos ambientais e evita danos à saúde pública e segurança da população, utilizando-se dos princípios da engenharia para confinar os resíduos às menores área e volume possíveis e permitidos. Os cursos hídricos, operadores e população vizinha devem ser protegidos, e a norma NBR 13.896 (ABNT, 1997) é responsável por fixar as condições mínimas de projeto, implantação e operação de aterros para estas condições.

## 2.2. Critérios Para Seleção de Áreas para Instalação de Aterro Sanitário

A construção de aterros sanitários requer licenciamento com avaliação de impacto ambiental, devendo ser projetados seguindo os critérios de engenharia dispostos nas normas específicas. Segundo a NBR 8.419 (ABNT, 1992), muitos critérios devem ser seguidos na implementação de um aterro sanitário. A apresentação de justificativa na escolha do local, como: vizinhança, distância entre corpos d'água, zoneamento ambiental e urbano, economia operacional, entre outras, é uma etapa importante. A proteção ambiental também deve ser uma preocupação na elaboração do projeto, incluindo-se, por exemplo, implantação de sistemas de drenagem de águas pluviais, impermeabilizações, monitoramento de solos e águas subterrâneas, sistemas de coleta e tratamento de líquidos percolados. De acordo com a NBR 13.896 (ABNT, 1997), o monitoramento de aterros e das águas subterrâneas deve continuar durante sua vida útil, incluindo o tempo de pós-fechamento.

Outra etapa importante consiste em realizar investigação geológica e geotécnica do terreno, também para auxiliar na avaliação de riscos, abordando aspectos como: litologia, perfil do solo, espessura, permeabilidade, homogeneidade, posição e dinâmica do lençol freático, importância do terreno em termos de recarga de água subterrânea. Segundo o tópico 5.1.4.3 da NBR 8.419 (ABNT, 1992), as investigações geológicas devem se valer de técnicas conhecidas e usuais da engenharia geológica, como: inspeção de reconhecimento, mapeamento de superfície, sondagens diretas, sondagens indiretas (métodos geofísicos) e/ou ensaios *in situ* e laboratoriais.

É interessante observar que a norma brasileira, já em 1992, não somente indica a execução de sondagens diretas, como é o caso das sondagens à Percussão (Standard Penetration Test - SPT), mas também a realização de ensaios geofísicos. Evidentemente, a escolha das técnicas a serem empregadas é função do técnico responsável, assim como a justificativa para tal.

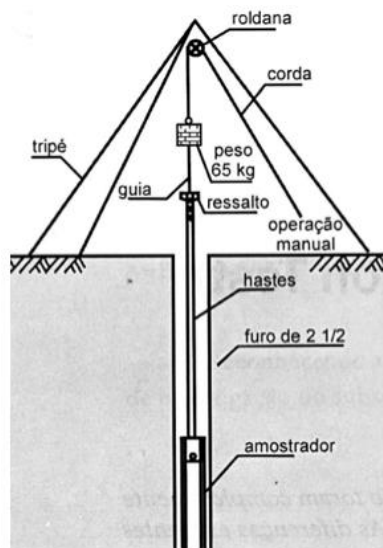
### 2.2.1. Sondagem à Percussão (SPT)

A sondagem à percussão, ou sondagem de simples reconhecimento de solos, SPT, costuma ser a mais empregada na engenharia de fundações, principalmente. São ensaios de baixo custo e os dados fornecidos, como resistência à penetração e horizontes do solo, normalmente são suficientes para o empreendimento pretendido.

A NBR 6.484 (ABNT, 2001) é responsável por normatizar o método de execução das sondagens SPT. De acordo com a norma, os principais objetivos deste tipo de ensaio são: determinar os tipos de solo nas profundidades alcançadas, destacar a posição do nível d'água e fornecer os índices de resistência à penetração a cada metro.

O equipamento utilizado na execução das sondagens é constituído por hastes metálicas e um amostrador, conhecido como Amostrador Raymond ou Terzaghi-Peck (SILVA, 2007). Em 1930 foi introduzida a contagem do número de golpes, chamado atualmente de NSPT, para penetrar no terreno o amostrador. No Brasil estes ensaios foram introduzidos em 1939, pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) (FOLLE, 2002).

Figura 1 – Esquema ilustrativo dos equipamentos utilizados num ensaio SPT



Fonte: Schnaid (2000)<sup>1</sup> apud Fonteles (2003).

A NBR 6.484 (ABNT, 2001) orienta quando à execução do ensaio. São utilizados a Torre (tripé com uma roldana e uma corda), a cabeça de bater (haste de aço que recebe o impacto direto do martelo), o amostrador padrão e o martelo (peso de 65 kg) para realização dos golpes sucessivos ao solo (Figura 1). Segundo a norma, a sondagem se inicia a partir da profundidade de 1 metro, escavado com auxílio de trado concha ou cavadeira manual. Os golpes são realizados liberando o martelo, em queda livre, de uma altura de 75cm, na haste. O ensaio é realizado em segmentos

<sup>1</sup> SCHNAID, F. (2000). Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações. São Paulo. Editora Oficina de Textos.

de 45 cm, para representar a profundidade de 1 metro, divididos em três trechos iguais de 15 cm. Anotam-se os golpes necessários à cravação de cada segmento de 15 cm do amostrador-padrão, até completar os 45 cm. Entretanto, apenas os 30 cm últimos são considerados para o cálculo do índice de resistência para a cota de 1 metro. A escavação até completar 1 metro, com auxílio do trado helicoidal, é realizado. Reinicia-se o processo de aplicação dos golpes.

Ainda de acordo com a norma, o processo de cravação do amostrador-padrão é interrompido sempre que ocorrer algumas das situações: o número de golpes ultrapassar 30, em qualquer dos três segmentos de 15 cm; um total de 50 golpes for aplicado durante toda a cravação (45 cm); não houver avanço do amostrador na aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo. O material ensaiado é considerado então impenetrável ao SPT.

### **2.3. Dados gerais sobre geração e disposição de resíduos sólidos**

No mundo são gerados atualmente cerca de 2,24 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano (WORLD BANK, 2022), cuja geração per capita corresponde a 0,79 kg por dia. Segundo Kaza et al. (2018), em países de baixa e média renda a geração per capita de RSU é inferior, mas crescente à medida em que os países apresentam maiores rendas (variações de 0,4 kg/hab/dia a 1,58 kg/hab/dia). Nestes países, os resíduos orgânicos correspondem a mais de 50% do total gerado. Os dados apresentados apontam que, geralmente, quanto mais alta é a renda do país, maior é a produção de RSU e menor é a proporção de resíduos orgânicos. Ainda de acordo com *World Bank Group* (KAZA et al., 2018), do montante total de resíduos sólidos produzidos no mundo, aproximadamente 37% são dispostos em aterros, 33% em lixões, 19% são enviados à compostagem e reciclagem e 11% à incineração. Países de baixa renda operam a maior parte de seus resíduos sólidos em lixões – 93% dos resíduos enviados aos lixões se encontram nestas regiões, enquanto em países de renda média-alta 54% dos resíduos são enviados a aterros. Finalmente, em países de alta renda, esta porcentagem é menor (39% são enviados a aterros), uma vez que estes países praticam a reciclagem, compostagem e incineração, diminuindo o volume de rejeitos dispostos.

Segundo dados da Abrelpe (2022), estima-se que o Brasil produziu em 2022 cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, sendo a região sudeste responsável por cerca de 49,7% da produção total do país, seguida da região nordeste (24,7%). Estes dados correspondem a uma geração per capita de 1,043 kg/hab/dia. Quando comparados aos dados de anos anteriores, percebe-se que a geração de resíduos vem aumentando aproximadamente 1%

ao ano, com um aumento atípico de 4% no ano de 2020 devido à mudança nos hábitos de consumo durante a pandemia do SARS-Cov-2 (ABRELPE, 2021, 2022).

Ainda de acordo com a Abrelpe (2022), o país enviou em 2022 cerca de 97,9% dos resíduos sólidos urbanos a aterros sanitários, aterros controlados e lixões. Destes, 61% foram enviados aos aterros sanitários, 39% aos aterros controlados e lixões. Dados anteriores do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, de 2019, mostram que o país encaminhou 1,6% dos resíduos coletados à reciclagem e apenas 0,48% à incineração (BRASIL, 2020a). Quando comparados à fração total de resíduos sólidos enviados a aterros em países como a Áustria (2,03%), Suécia (0,76%) e Alemanha (0,82%), cujas atividades de reciclagem, compostagem e incineração predominam (EUROSTAT, 2022), constata-se a dependência e demanda do Brasil por ambientes de disposição de resíduos. No entanto, a realidade do Brasil poderia ser diferente e assemelhar-se aos países desenvolvidos. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (BRASIL, 2020a), até 76% dos resíduos sólidos coletados atualmente no país poderiam ser enviados à destinação final ambientalmente adequada, ou seja, à reciclagem e/ou à compostagem. O tratamento adequado destes resíduos reduziria o volume de rejeitos nos aterros e consequentemente os impactos ambientais provenientes da disposição final. Este cenário tem levantado discussões ao longo dos anos, fomentando elaboração e manutenção de leis que visam contribuir com a gestão adequada dos resíduos sólidos.

Desde a promulgação da Constituição Federal (BRASIL, 1988) os municípios são dotados de certa autonomia, com faculdade de legislar sobre assuntos de interesse local, complementar a legislação federal e estadual, organizar e prestar serviços públicos de interesse local, ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes (art. 30, inc. I, II e V e art. 182). Ou seja, os municípios eram sugestivamente conduzidos à responsabilidade de prestar serviços de gestão e manejo dos resíduos sólidos.

Após debate entre Ministérios, órgãos, sociedade e legisladores, a Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Esta é a primeira lei que estabelece uma política adequada de gestão integrada e gerenciamento ambientalmente correto de resíduos sólidos, com medidas adotadas pelo Governo Federal, de forma isolada ou em cooperação com Estados, Distrito Federal, Município ou particulares.

A implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece a ordem de prioridade de ações a serem realizadas com os resíduos, art. 9º: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e, esgotadas todas as possibilidades, disposição final dos rejeitos em aterros. Os estados ficam incumbidos de elaborar um Plano Estadual de Resíduos Sólidos, assim como os municípios ficam incumbidos de elaborar um Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos (PMGIRS). Estes planos são necessários para que estados e municípios tenham acesso a recursos da União.

O Plano elaborado pelo estado deve conter diagnóstico dos resíduos, proposição de cenários, metas, programas, projetos e ações de redução, reutilização, reciclagem, aproveitamento energético dos gases e eliminação e recuperação de lixões, previsão de zonas favoráveis para disposição e áreas degradadas a serem recuperadas, além de meios para controle e fiscalização de sua implantação e operacionalização. Já o Plano elaborado pelo município deve conter diagnóstico da situação dos resíduos sólidos, procedimentos operacionais de limpeza e manejo dos resíduos, metas de gerenciamento e aproveitamento energético, metas de redução, reutilização, coleta seletiva e reciclagem, programas de capacitação técnica e educação ambiental, identificação dos passivos ambientais relacionados aos resíduos sólidos, dentre outras. A Lei 12.305/2010 ainda previa a implantação da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos em até quatro anos, ou seja, a extinção de lixões até 2014, o que não ocorreu.

Em 2020 foi sancionado o novo marco legal do saneamento, estabelecendo novos prazos para extinção de lixões e aterros controlados, que, segundo a Lei 14.026 (BRASIL, 2020b), estão condicionados à existência de PMGIRS e ao número de habitantes no município. De forma geral, a lei prevê que a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deverá ser implantada entre o ano de 2021, para capitais e cidades de regiões metropolitanas, até agosto de 2024, para municípios com população inferior a 50.000 habitantes no Censo 2010.

Apesar dos avanços na gestão dos resíduos sólidos no país, os resultados ainda distam do desejado. A parcela de resíduos enviados à reciclagem ou tratamento é praticamente nula e os resíduos ainda são dispostos inadequadamente em aterros controlados e lixões. A gestão ineficiente dos resíduos sólidos, ocorrida ao longo das últimas décadas, tem causado diversos impactos ambientais ao meio ambiente e à população, como degradação ambiental,



contaminação do lençol freático, poluição do ar, morte de animais, emissão de gases do efeito estufa (SHINZATO, 2014; VELOZO, 2006).

#### **2.4. Impactos Ambientais e Saúde Humana**

Diversas pesquisas têm estudado o potencial nocivo de lixões para a saúde humana, poluindo o ar, o solo, as águas subterrâneas e até mesmo prejudicando a saúde da população que reside próximo aos locais de disposição inadequada de resíduos sólidos.

Os resíduos sólidos estão entre os principais setores que contribuem com o efeito estufa, na emissão de gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), majoritariamente. O metano tem potencial poluidor de até 28 vezes o dióxido de carbono para o horizonte de 100 anos, o que suscita maior preocupação com a emissão deste gás (IPCC, 2014). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) as emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> têm as maiores contribuições nas emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes no mundo, sendo o setor a terceira maior fonte antropogênica de emissão de metano (MYHRE et al., 2013), com o Brasil entre os 10 países que mais contribuem com estas emissões (ZHAO, 2019). Nos aterros sanitários o metano é produzido pela ação de bactérias anaeróbias na decomposição da matéria orgânica, o que contribui fortemente para as emissões de CH<sub>4</sub> nos resíduos sólidos (REGATTIERI, 2009). Alternativas à disposição em aterros, a exemplo da reciclagem e compostagem, reduzem significativamente a emissão deste gás (INÁCIO; BETTIO; MILLER, 2010; KRISTANTO; KOVEN, 2019; ZUBERI; ALI, 2015).

Qasim et al. (2020) realizou ampla revisão bibliográfica a respeito dos impactos do lixo na ecologia dos insetos e saúde humana, apontando em seu estudo a presença de insetos vetores de várias doenças em regiões em que o lixo é disposto inapropriadamente, sem atividades de compactação, cobertura, compostagem e pulverização de inseticidas nas regiões. Trabalhos de Deloraine et al. (1995), Abiola et al. (2021) e Corrêa et al. (2011) têm indicado que residir nas proximidades de lixões ou manter contato regularmente é potencial fator de risco para desenvolvimento de sintomas respiratórios em crianças e adultos.

A disposição inadequada de resíduos sólidos também pode acarretar problemas ambientais. Sisino (2003) mostrou em seu artigo que a disposição de resíduos sólidos não inertes em aterros controlados pode acarretar o aumento da concentração de substâncias como alumínio, ferro, manganês, fenol e tensoativos no solo e águas subterrâneas, com potencial para alterar a

qualidade das águas e acarretar em problemas para a saúde humana. Han et al. (2016), Jhamnani e Singh (2009) e Abiriga, Vestgarden e Klempe (2020) trazem estudos apontando a contaminação de águas subterrâneas por lixiviados nas proximidades de aterros, detectando poluentes nas águas, como sais inorgânicos, metais pesados, poluentes bacteriológicos, dentre outros. Apesar da contaminação diminuir com aumento da distância, ambos os artigos apontaram a captação das águas subterrâneas analisadas como imprópria para o consumo.

Além das investigações tradicionais para verificar contaminação de solos e águas subterrâneas, pelos métodos diretos, também podem ser empregados métodos indiretos no auxílio à caracterização de plumas de contaminação e ao monitoramento de aterros e lixões. Estas análises podem ser realizadas a partir do estudo do contraste de algumas propriedades físicas das estruturas ou corpos em relação ao meio que os circundam, ou seja, através da aplicação da Geofísica, obtendo-se propriedades físicas capazes de caracterizar os materiais de interesse.

A geofísica aplicada pode atuar em diversas áreas. Segundo Braga (2016), uma das grandes vantagens em relação aos métodos diretos de investigação do subsolo, é a capacidade em controlar as alterações geológicas provocadas pelo homem sem afetar o ambiente geológico. Este fato proporciona a execução das investigações geofísicas diversas vezes na mesma área. Ainda segundo o autor, os custos também podem ser inferiores a perfurações por sondagens mecânicas. Os resultados geofísicos podem fornecer informações complementares importantes, antes ou após o empreendimento, mas é ideal que seja usada estrategicamente e em conjunto com sondagens, para economia de tempo e custos.

## **2.5. Aplicações da Geofísica**

A crescente preocupação com a preservação ambiental e a saúde da população tem impulsionado um maior número de pesquisas e estudos que buscam estabelecer relação entre os resíduos dispostos no solo e o ambiente geológico. Uma linha de pesquisa em grande desenvolvimento é a aplicação de métodos geofísicos, em especial os geoeletricos, na caracterização de áreas de disposição de resíduos, determinando propriedades das camadas do subsolo através dos parâmetros resistividade elétrica e cargabilidade. Exemplos de aplicações de métodos geoeletricos em estudos ambientais vêm mostrando presença marcante na literatura.

Apesar do assunto tomar maiores proporções nos dias de hoje, estes estudos não são recentes. Desde o final da década de 60 e início dos anos 70, inúmeros exemplos de aplicação da geofísica

no estudo de contaminações ocasionadas pela disposição incorreta de resíduos urbanos podem ser encontrados na literatura, com o método da eletrorresistividade amplamente utilizado (KELLY, 1976; STOLLAR; ROUX, 1975). Ainda no século XX, trabalhos como de Carpenter et al. (1990) mostraram que a utilização de métodos geoeletricos, quando adequadamente escolhidos e aplicados, podem fornecer informações relevantes da localização, geometria de depósitos de resíduos, posição da zona saturada e sentido do fluxo subterrâneo.

Brahmi et al. (2021) estudaram a aplicação dos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida em aterro na província de Tebessa, na Argélia. O objetivo foi investigar a extensão da contaminação das águas subterrâneas e do solo dentro e ao redor do aterro municipal, através de análises geoquímicas e métodos geoeletricos. Os autores identificaram, a partir dos métodos geoeletricos, zonas altamente condutivas, sendo justificadas pela infiltração do lixiviado, com anomalias de baixa resistividade migrando em direção ao fluxo do aquífero. A integração dos dois métodos permitiu diferenciar os limites entre os resíduos e a região contaminada por lixiviado, além de delinear sua direção e extensão. Os autores afirmam que este estudo mostrou o potencial dos métodos geoeletricos na investigação hidrogeológica, cujos resultados apontam a degradação da qualidade da água, e na caracterização da poluição em aterros.

Miura et al. (2013) estudaram a aplicação do método de eletrorresistividade na determinação da distribuição de resistividade em subsuperfície. O local de estudo abrangeu duas áreas contaminadas: uma indústria química contaminada por hidrocarbonetos derivados do petróleo, em São Paulo – SP, e um aterro de resíduos sólidos, em Bauru – SP. Os autores identificaram, no levantamento realizado na área do aterro, anomalia condutora com resistividade baixa, se alongando no sentido do fluxo subterrâneo. Esta anomalia foi interpretada como pluma de contaminação, cuja interpretação condiz com os dados de poços de monitoramento dispostos ao redor do aterro, que apresentaram aumento da concentração de íons cloreto.

Outros trabalhos similares, de autores como Braga (2006), Lago et al. (2009), Mondelli et al. (2007), Ustra (2008), também apresentaram resultados satisfatórios para uso de métodos elétricos na detecção de contaminantes por disposição de resíduos. Mas a geofísica também pode ser aplicada, no contexto dos resíduos sólidos, na investigação geológica para instalação de aterro, no monitoramento destas unidades de disposição e na caracterização do local onde os resíduos foram dispostos.

Leroux e Dahlin (2007) desenvolveram estudo em antigo aterro a ser restaurado para instalação de área verde de lazer, localizado no sul da Suécia. Os resultados deste estudo demonstraram a aplicabilidade dos métodos geoeletricos, especificamente da resistividade e da polarização induzida (IP), na delimitação espacial dos resíduos em relação ao subsolo. Quando comparadas as seções obtidas no estudo em questão com perfurações geotécnicas anteriormente realizadas, os resultados foram consistentes, cujos dados possibilitam a identificação de uma cobertura fina já existente no aterro e o mapeamento da extensão desta cobertura ao longo do perfil analisado. A partir destes resultados, pôde-se orientar quanto à instalação de nova camada de cobertura adequada ao objetivo do empreendimento – implantação de área de lazer, com consequente redução de custos.

Soupios et al. (2007) utilizaram a resistividade elétrica em área de aterro situado na região de Creta, realizando sete tomografias geoeletricas nas adjacências deste aterro, com objetivos diversos além da identificação de contaminação do subsolo. A partir do método indireto foi possível determinar a distribuição espacial de vazios, em solo cárstico, que haviam sido anteriormente detectados durante a confecção de uma fundação de edifício localizado a oeste do aterro. Segundo os autores, este método pode ser aplicado em questões de engenharia envolvendo fundações de edifícios e subsuperfícies instáveis ou fracas devido à presença de vazios ou fraturas. Além disso, o trabalho demonstrou a capacidade do método em determinar a espessura dos resíduos depositados no aterro e em planejar, a partir das características geológicas estudadas, outros locais de possível disposição de resíduos, nas adjacências. Os dados foram confrontados com registros de poços e outras medições.

Gallas, Taioli e Cruz (2006) realizaram levantamento geofísico, no município de Timburi/SP, com objetivo de selecionar o melhor ambiente para instalação de aterro sanitário, onde afloram rochas da formação Botucatu. Foram determinadas as espessuras da rocha e do solo e verificadas presenças de fraturas nas rochas basálticas. Através do método da eletrorresistividade foi possível excluir áreas com basalto de baixa espessura e rochas contendo fraturas verticais, com potencial para contaminar o aquífero Guarani, e selecionar uma área mais adequada.

### 3. MÉTODOS GEOFÍSICOS

Os métodos geofísicos são métodos não invasivos que estudam, através de parâmetros físicos como campo magnético, propagação de ondas sísmicas, gravidade, campos elétricos e eletromagnéticos, o interior da Terra. Dentre os grupos que estudam estas propriedades, tem-se os métodos gravimétricos, os magnetométricos, os geoeletricos e os sísmicos (BRAGA, 2006). Neste projeto foram utilizados os métodos da eletrorresistividade (ER) e da polarização induzida (IP), ambos métodos geoeletricos. Estes métodos utilizam um campo artificial a partir de correntes diretas ou alternadas de baixa frequência, criado por equipamentos apropriados, na investigação dos parâmetros físicos e seus contrastes. Estes parâmetros físicos se alteram na presença de contaminantes no subsolo e pela existência de diferentes tipos de materiais, de solos e de rochas (MAZAC; KELLY; LANDA, 1987). Nos métodos aplicados neste trabalho, ER e IP, os parâmetros estudados são a resistividade e a cargabilidade, respectivamente.

As técnicas de investigação ou os principais tipos de procedimento empregados nestes levantamentos são realizados principalmente a partir da configuração dos eletrodos que fornecem corrente (eletrodo de corrente - AB) e dos eletrodos que recebem e fazem a leitura dos valores dos parâmetros físicos (eletrodos de potencial - MN). Estas técnicas podem ser realizadas por sondagens elétricas, caminhamentos elétricos e perfilagens elétricas.

A técnica de perfilagem elétrica é aplicada, principalmente, segundo Braga (2016), na hidrogeologia e na prospecção de petróleo. É realizada no interior de furos de sondagens mecânicas e os parâmetros físicos são investigados lateral e verticalmente.

A técnica da sondagem elétrica vertical (SEV) é utilizada quando se deseja investigar em profundidade o subsolo, num levantamento unidimensional. Neste caso, a corrente e os eletrodos de corrente e de potencial são mantidos a uma distância relativa e o arranjo é realizado ao redor de um ponto central (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009). À medida em que a distância entre os eletrodos de corrente aumenta, a profundidade que a corrente penetra também aumenta (REYNOLDS, 2011). A profundidade desejada pode ser investigada a partir de diferentes arranjos entre os eletrodos de corrente e potencial, conforme será apresentado à frente.

A técnica do caminhamento elétrico é utilizada em investigações horizontais e de profundidade, ou seja, em levantamentos bidimensionais, em que se deseja analisar e interpretar determinados parâmetros geoeletricos. Os eletrodos de corrente e de potencial são deslocados ao longo de

uma linha, para que sejam alcançadas maiores distâncias e variações horizontais dos parâmetros físicos, nas profundidades desejadas (ISRIL et al., 2007; LOKE, 1999; OLIVEIRA, 2009). Os diferentes arranjos entre os eletrodos podem ser empregados nas investigações em profundidade e lateralmente. Os resultados podem ser apresentados em mapas, com seções geelétricas 2D (BRAGA, 2016).

### 3.1. Eletrorresistividade

Conceitos básicos dos métodos de resistividade foram inicialmente tratados por Conrad Schlumberger, na França, em 1912, e originalmente empregados nas indústrias do petróleo e da mineração. A partir dos anos 80 estas técnicas foram transformadas em efetivas e eficientes ferramentas para avaliar as condições e características do solo (ALLRED; DANIELS; EHSANI, 2008). Atualmente são frequentemente utilizadas em diversas áreas: na busca de fontes de águas subterrâneas e monitoramento de poluição destas águas e do solo, na localização de falhas, fissuras e poços de minas, no mapeamento da extensão de remanescentes de fundações enterradas de edifícios antigos, dentre outras aplicações (REYNOLDS, 2011).

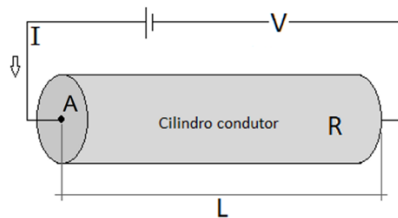
O método da eletrorresistividade é caracterizado pela investigação da propriedade física resistividade elétrica e é compreendido no contexto da geofísica como o estudo do fluxo de corrente através do subsolo, constituído por diferentes camadas com diferentes resistividades (HERMAN, 2001). A dificuldade encontrada pela corrente elétrica na passagem num determinado material, ou ainda, a medida do quão bem o material retarda o fluxo de corrente, define o conceito resistividade (BRAGA, 2016; HERMAN, 2001).

A propagação de corrente elétrica ocorre de três maneiras: por condução eletrônica, eletrolítica (ou iônica) e dielétrica. A condução eletrônica ocorre em materiais contendo elétrons livres, como em metais e semicondutores. A condução dielétrica ocorre em maus condutores ou isolantes, que sob campo elétrico externo têm seus elétrons ligeiramente deslocados em relação ao seu núcleo. A condução iônica ocorre a partir do deslocamento de íons presentes nas águas dos poros de solos, de sedimentos inconsolidados e/ou de fissuras de rochas, e é o tipo propagação que normalmente ocorre nas rochas (FEITOSA et al., 2008; REYNOLDS, 2011; TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

A resistividade pode ser discutida a partir de um cilindro ideal, de comprimento  $L$ , área de seção transversal  $A$  e resistência  $R$  (Figura 2), cujo material resiste ao fluxo de corrente elétrica  $I$  que

ocorre ao longo do seu comprimento, resultando numa queda de potencial elétrico  $\Delta V$ . O potencial elétrico é dado pela expressão  $\Delta V = -RI$ , onde o sinal negativo representa as direções opostas entre o fluxo de corrente e o incremento de potencial elétrico.

Figura 2 - Cilindro ideal



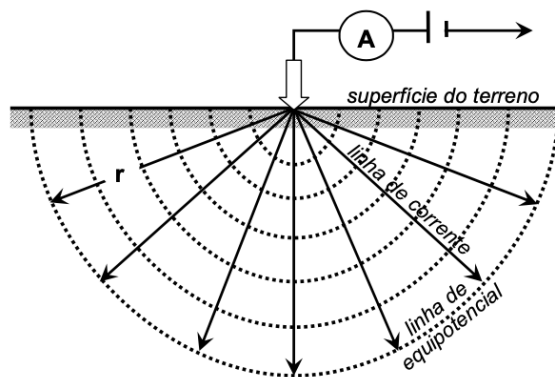
Fonte: Autor.

Com base na Lei de Ohm, a resistividade  $\rho$  é definida segundo a equação seguinte:

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (1)$$

A equação apresentada pode ser utilizada no cálculo da resistividade de materiais homogêneos e isotrópicos, em formas geométricas regulares, como cilindros, cubos, paralelepípedos (ZOHDY; EATON; MABEY, 1974). Considerando o fluxo de corrente numa Terra homogênea e de resistividade uniforme, a corrente flui radialmente a partir de um eletrodo (fonte) localizado na superfície do solo (Figura 3) e o potencial diminui em direção ao fluxo de corrente, ou seja, diminui com o aumento da distância à fonte. Os pontos de mesmo potencial, ou linhas equipotenciais, são perpendiculares às linhas de corrente.

Figura 3 – Fluxo de corrente numa terra homogênea, considerando um semi-espaco



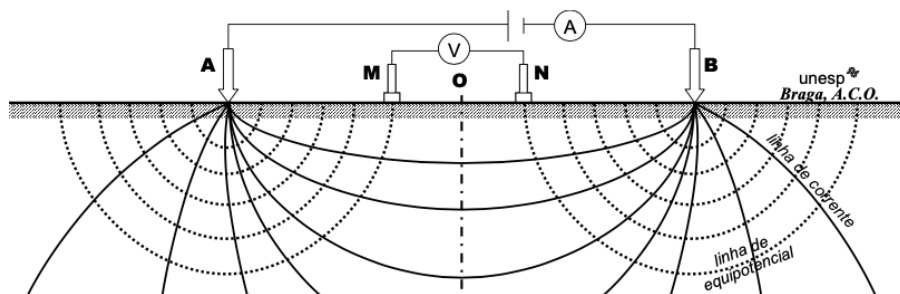
Fonte: Braga (2006).

A uma distância  $r$  da fonte de corrente, a área da semiesfera será  $2\pi r^2$  e a resistividade verdadeira numa semiesfera homogênea pode ser calculada como:

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

Na prática, ao serem realizados levantamentos de resistividade, a corrente elétrica artificial é aplicada no subsolo através de dois eletrodos de corrente, e a diferença de potencial é medida por dois eletrodos de potencial (Figura 4).

Figura 4 - Configuração usual dos arranjos de eletrodos em campo



Fonte: Braga (2006).

A diferença de potencial entre os eletrodos M e N é medida segundo a relação  $\Delta V_{MN} = V_M - V_N$ , onde, considerando um solo homogêneo e isotrópico, de intensidade de corrente  $I$  e resistividade elétrica ( $\rho$ ) do meio uniforme, o potencial em cada eletrodo será:

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (3)$$

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (4)$$

Desta forma, a diferença de potencial será:

$$\Delta V_{MN} = \left[ \left( \frac{1}{AM} \right) - \left( \frac{1}{AN} \right) - \left( \frac{1}{BM} \right) + \left( \frac{1}{BN} \right) \right] \rho I (2\pi)^{-1} \quad (5)$$

Rearranjando os termos, a medida da resistividade é dada pela expressão:

$$\rho = \frac{K \Delta V}{I} \quad (6)$$

Onde  $K$  é o coeficiente geométrico, de dimensões de comprimento, que varia segundo a geometria do arranjo dos quatro eletrodos em superfície, dado por:




$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) + \left(\frac{1}{BN}\right)} \quad (7)$$

Estas equações são válidas para um meio homogêneo e isotrópico, e a resistividade calculada segundo a Equação (6) é a resistividade verdadeira do material. Mas a Terra não possui estas propriedades ao longo de todo o subsolo. Uma vez que a resistividade elétrica real varia lateral e verticalmente, a Equação (6) fornecerá o cálculo de uma resistividade aparente, expressa em ohm.m, influenciada por todas as resistividades verdadeiras das camadas do meio na área investigada (REYNOLDS, 2011; ZOHDY; EATON; MABEY, 1974). A resistividade aparente não é uma propriedade física do meio e, portanto, a resistividade verdadeira pode ser obtida a partir de métodos de inversão (HERMAN, 2001).

Um determinado tipo litológico pode apresentar diferentes valores de resistividades, assim como as resistividades se diferem entre diferentes tipos litológicos. Em ambos os casos, a resistividade é determinada através de propriedades como teor de umidade, porosidade, composição mineralógica, grau de saturação, tamanho e forma das partículas, dentre outras (BRAGA, 2016; KEAREY; BROOKS; HILL, 2009). Na Tabela 1 é possível observar os intervalos de valores de resistividade para sedimentos insaturados, saturados e para rochas. Observa-se que, para sedimentos não saturados, o intervalo de resistividade é alto e pouco conclusivo, enquanto a presença de água é fator importante para avaliar esta propriedade. Segundo Kearey, Brooks e Hill (2009), a porosidade é a principal característica de controle da resistividade das rochas, em que uma é inversamente proporcional à outra. Complementarmente, Braga (2016) também apresenta a resistividade como propriedade inversamente proporcional a características como saturação em água, salinidade e conectividade dos poros.

As rochas ígneas costumam apresentar resistividades mais altas, enquanto as rochas sedimentares apresentam porosidade elevada e tendem a ser mais condutoras. Já as rochas metamórficas apresentam resistividade intermediária. Nos solos, a resistividade para um material arenoso diminui quanto maior o teor de argila, chegando a valores mínimos de resistividade quando compostos praticamente de argila.

Tabela 1 - Faixa de valores de resistividade para sedimentos, rochas e águas

Sedimentos / Rochas / Águas		Resistividade (ohm.m)
Insaturados		$30 - 10^4$
Águas doces superficiais		$10 - 10^3$
Águas marinhas		$10^{-1}$
Saturados 	Argiloso	$0,8 - 10^2$
	Argilo-arenoso	$20 - 40$
	Areno-argiloso	$40 - 60$
	Arenoso	$50 - 2 \times 10^3$
	Argilito	$10 - 8 \times 10^2$
	Arenito	$50 - 4 \times 10^3$
	Folhelho	$0,5 - 2 \times 10^3$
	Calcário poroso	$80 - 8 \times 10^3$
	Calcário denso	$2 \times 10^3 - 10^6$
	Granito	$5 \times 10^2 - 10^6$
	Gabro	$10^3 - 10^6$
	Diabásio	$20 - 5 \times 10^7$
	Basalto	$10 - 1,3 \times 10^7$
	Quartzito	$10 - 2 \times 10^8$
Metamórficas em geral	$50 - 10^6$	
Ígneas em geral	$10^2 - 10^6$	

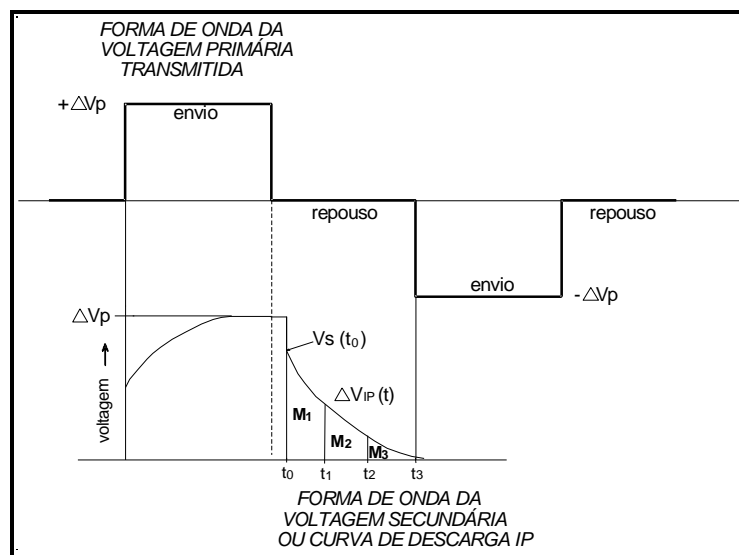
Fonte: Compilado de Braga (2016); Sumner (1976); Kearey, Brooks e Hill (2009); Telford, Geldart e Sheriff (1990).

### 3.2. Método de Polarização Induzida (IP)

O método da polarização induzida é uma técnica também explorada pelos irmãos Schlumberger, que reconheceram o fenômeno da polarização por volta de 1913. Entretanto, a polarização induzida como ferramenta geofísica somente ganhou popularidade após a década de 1950, na exploração mineral e petrolífera (REYNOLDS, 2011; TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). Atualmente, o método é aplicado especialmente na prospecção de minérios e de águas subterrâneas, na exploração geotérmica e na detecção de contaminantes orgânicos difíceis de serem detectados a partir de outros métodos (REYNOLDS, 2011).

Corrente elétrica é injetada no solo, a partir de um arranjo padrão de resistividade em modo de corrente contínua, e desligada abruptamente. Ao ser desligada, o que se observa é um decrescimento gradual da voltagem entre os eletrodos de potencial não polarizáveis, num tempo finito e mensurável, até decair para zero. Em outras palavras, observando as formas de onda da Figura 5, no decaimento da voltagem medido em função do tempo, ao ser desligada a corrente aplicada no solo, a tensão real cai instantaneamente a uma quantidade  $V_s$ , e a tensão residual  $V_{IP}$  decai com o tempo, segundo a curva de descarga  $\Delta V_{IP}(t)$  (REYNOLDS, 2011). Da mesma forma, quando a corrente é religada, observa-se um aumento inicial repentino da voltagem, seguido de um aumento gradual até atingir um valor estável (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009).

Figura 5 - Variação do potencial ( $\Delta V$ ) com o tempo, onde a linha pontilhada vertical indica o momento em que a corrente é interrompida



Fonte: Braga (1997).

O solo age como um capacitor, armazenando carga elétrica, e o fenômeno descrito é chamado de polarização induzida (IP) ou residual, no domínio do tempo - foco deste trabalho (KRISTIANSEN, 1997; TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). O tempo de decaimento gradual da voltagem pode variar de segundos a minutos e a medida do efeito IP é a relação  $V_{IP}/V_P$ , chamada de cargabilidade aparente e expressa em milivolts/volts ou em porcentagem (REYNOLDS, 2011).

A cargabilidade também pode ser medida através da integração da curva de descarga IP, durante o intervalo de tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$ , tal que:

$$M = \frac{1}{\Delta V_P} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IP}(t) dt \quad (8)$$

De maneira similar e utilizando um mesmo arranjo de eletrodos, ao ser empregada uma fonte variável de baixa frequência, a propriedade capacitiva do solo causa uma variação da resistividade aparente que, quando medida em duas ou mais baixas frequências, é conhecida como IP no domínio da frequência.

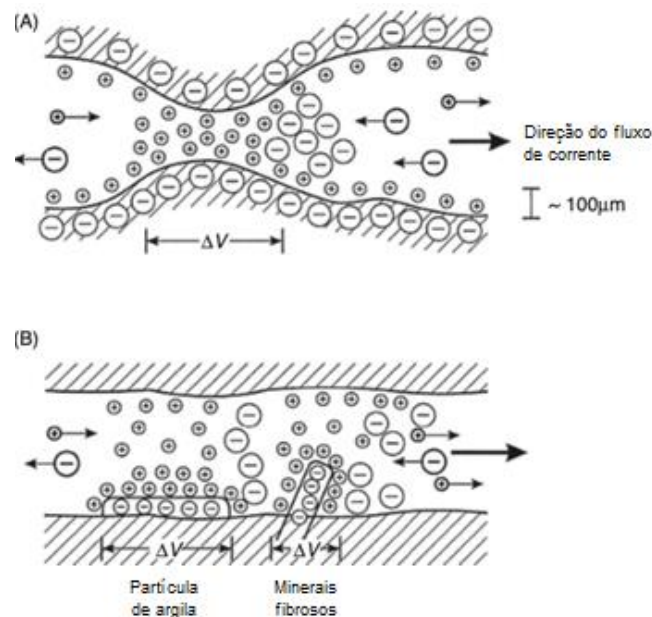
A energia armazenada no material pode existir em várias formas, como energia mecânica, elétrica e química, entretanto os estudos vêm mostrando que a energia química é a de maior importância. Os fenômenos físico-químicos que explicam esta polarização não são simples. Compreende-se que o fenômeno de armazenamento de energia pelas rochas pode acontecer como resultado de dois eventos: variações na mobilidade de íons no fluido ao longo da estrutura da rocha, chamado de polarização de membrana ou eletrolítica, ou de variações entre condutividades iônica e eletrônica na presença de minerais metálicos, chamado de polarização metálica ou eletrônica (BRAGA, 2006, 2016).

### 3.2.1. Polarização Eletrolítica

Reynolds (2011) aponta o fenômeno de polarização eletrolítica como resultado de dois episódios: a constrição dentro de um canal dos poros e a presença de argila dentro dos canais. O fenômeno é mais comum na presença de minerais argilosos e na polarização por membrana não há presença de minerais metálicos nas rochas (BRAGA, 2016).

Os minerais que formam as rochas têm, em sua maioria, carga total negativa nas superfícies em contato com o fluido. Consequentemente, quando corrente é aplicada, os íons positivos dentro do fluido dos poros são atraídos para a superfície (Figura 6), formando uma camada de cargas positivas de até 100  $\mu\text{m}$  de espessura. Quando o diâmetro do canal dos poros é inferior ou igual à camada formada pelos íons positivos, esta constrição impedirá o movimento dos íons ao longo do fluido (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009; TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). Este fenômeno gera um aumento na concentração de íons positivos ao redor da região bloqueada, criando uma diferença de potencial. Quando a corrente é desligada, os íons retornam às suas configurações originais, num tempo  $t$  finito, como foi apresentado na curva de descarga da Figura 5 (REYNOLDS, 2011). Ao longo deste processo ocorre o decaimento gradual da voltagem e a resposta IP é medida.

Figura 6 - Polarização de membrana após aplicação de um campo elétrico, associado (A) a uma constrição dos poros e (B) à presença de partículas de argila



Fonte: Modificado de Reynolds (2011).

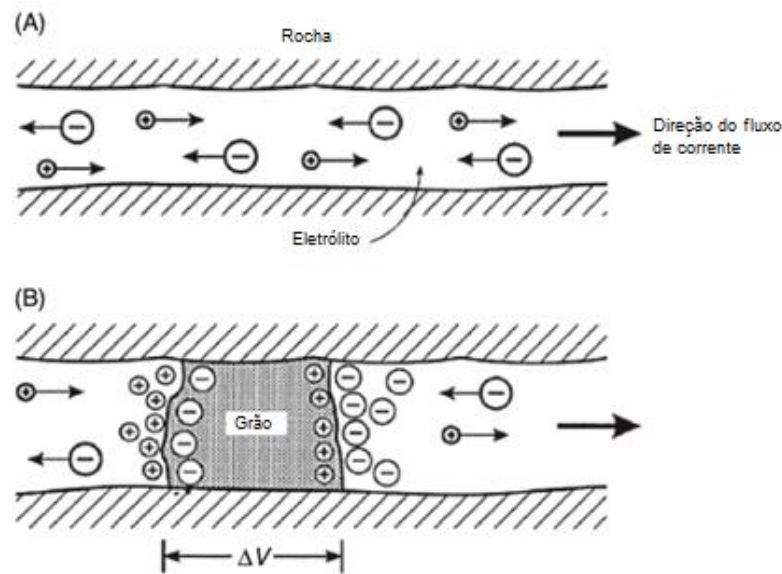
Ainda segundo Reynolds (2011), na presença de partículas de argila ou minerais fibrosos, os íons positivos são atraídos pela carga líquida negativa destes minerais, transportando nuvens catiônicas para os espaços dos poros. Na presença de corrente, as cargas positivas podem se movimentar entre as nuvens, enquanto os ânions têm sua movimentação impedida. Este fenômeno é responsável pelo surgimento de uma diferença de concentração e conseqüentemente diferença de potencial. A resposta IP é medida a partir do momento em que a corrente aplicada é suprimida e a diferença de concentração iônica decai para níveis normais (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009; REYNOLDS, 2011).

### 3.2.2. Polarização Metálica

Quando uma rocha com presença de minerais metálicos é submetida à corrente elétrica, é observada uma perturbação no equilíbrio iônico da solução nos poros, fraturas e microfissuras desta rocha. Se um grão mineral bloqueia um canal de fluxo, os íons negativos e positivos se concentram em cada lado do grão (Figura 7), na tentativa de ceder elétrons aos grãos ou receber através deles, respectivamente (BRAGA, 2016; KEAREY; BROOKS; HILL, 2009; TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). O fluxo de corrente é prejudicado e o grão se torna polarizado. Quando corrente é desligada, os íons retomam o equilíbrio original e a diferença de potencial é reduzida a zero, num tempo finito. Segundo Reynolds (2011), são estes os fatores

que podem ser responsáveis pelo reestabelecimento do equilíbrio iônico: o tamanho e a forma dos poros, a estrutura da rocha, a permeabilidade, a condutividade eletrolítica, a concentração iônica e a condutividade eletrônica do grão.

Figura 7 - Polarização eletrônica após aplicação de um campo elétrico, para (A) fluxo irrestrito e (B) com grão polarizado bloqueando a passagem.



Fonte: Modificado de Reynolds (2011).

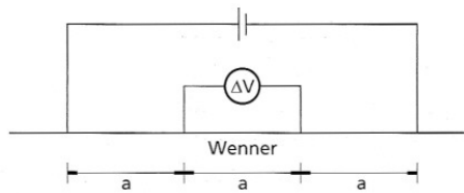
### 3.3. Arranjo de eletrodos

As técnicas de desenvolvimento de campo dos métodos geoeletricos exigem trabalho com arranjos determinados dos eletrodos de corrente e de potencial. Os arranjos mais comuns, empregados nas técnicas citadas são: Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo.

- Arranjo Wenner

O arranjo Wenner utiliza quatro eletrodos, em linha, espaçados igualmente (Figura 8). A investigação em profundidade é realizada expandindo-se os eletrodos em torno de um ponto central, ou seja, aumentando o espaçamento 'a' uniformemente. A investigação horizontal ocorre a partir do deslocamento do arranjo ao longo do perfil (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009). Segundo Gandolfo (2007), as vantagens deste arranjo se devem à elevada razão sinal/ruído e à menor susceptibilidade a variações superficiais de resistividade. A principal desvantagem é a rápida perda de cobertura de profundidade devido ao aumento do espaçamento entre os eletrodos de corrente e potencial.

Figura 8 - Esquema do arranjo Wenner, com dois eletrodos de corrente posicionados nas extremidades e dois eletrodos de potencial no centro.

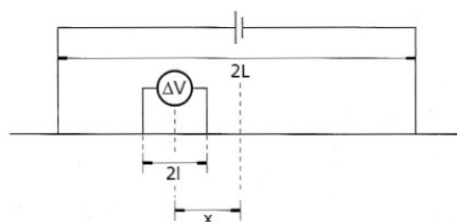


Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009).

- Arranjo Schlumberger

Quatro eletrodos, dois de corrente e dois de potencial, são utilizados no arranjo do tipo Schlumberger. Os eletrodos de potencial são espaçados numa distância ( $2l$ ) menor que os eletrodos de corrente ( $2L$ ) (ver Figura 9), para  $AB \geq 5MN$  segundo Zohdy e Mabey (1974). Para uma investigação vertical, os eletrodos de potencial permanecem, a princípio, fixos, enquanto os eletrodos de corrente são espaçados simetricamente em relação ao ponto central. Para manter um potencial mensurável, caso a distância entre os eletrodos de corrente seja grande (grandes valores de  $L$ ), o espaçamento entre os eletrodos de potencial também é aumentado (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). De acordo com Kearey, Brooks e Hill (2009), para um levantamento horizontal, os eletrodos de potencial podem ser deslocados sem que seja necessário mover os de corrente. Gandolfo (2007) assegura, em seu trabalho, que uma das vantagens do arranjo Schlumberger é produzir boa resolução vertical, tornando-o útil e usualmente empregado nas sondagens elétricas verticais.

Figura 9 - Esquema do arranjo Schlumberger, com dois eletrodos de corrente posicionados nas extremidades e dois eletrodos de potencial ao centro



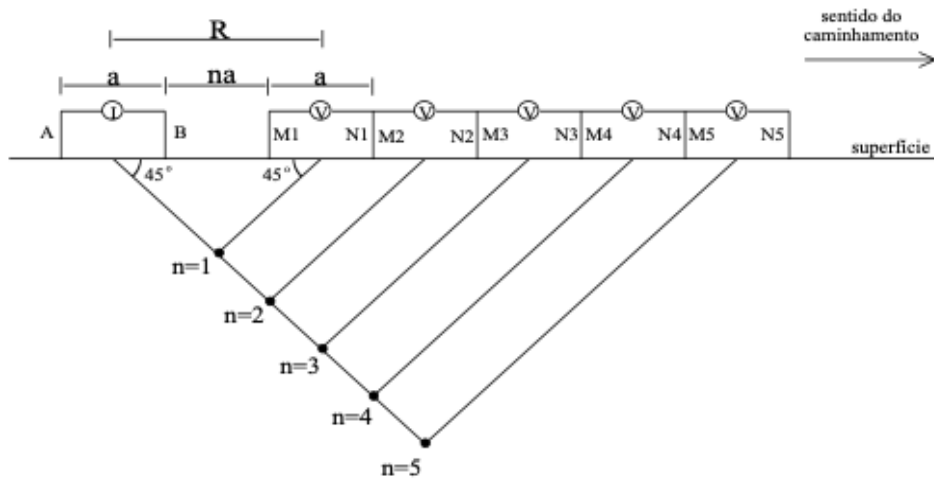
Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009).

- Arranjo Dipolo-Dipolo

O arranjo Dipolo-Dipolo é frequentemente utilizado em investigações bidimensionais e foi o arranjo utilizado neste trabalho. Os eletrodos são posicionados de forma alinhada e o

espaçamento ( $a$ ) entre os eletrodos de potencial e entre os eletrodos de corrente são iguais (GANDOLFO, 2007). Cada dipolo MN equivale a um nível de investigação ou profundidade diferente (Figura 10) e uma maior produtividade de investigação pode ser obtida instalando-se vários pares de eletrodos de potencial. Para investigação horizontal os eletrodos de corrente são deslocados ao longo do perfil, sempre que a última profundidade teórica desejada é medida. A região de leitura dos parâmetros é atribuída ao ponto médio entre os centros dos dipolos, cuja projeção de 45 graus se estende a partir do centro de cada dipolo (BRAGA, 2016).

Figura 10 - Esquema do arranjo dipolo-dipolo, com dois eletrodos de corrente posicionados à esquerda e dois eletrodos de potencial à direita



Fonte: Gandolfo (2007).

### 3.4. Inversão Geofísica

Num estudo geoeletrico, uma vez conhecidas informações da área estudada (parâmetros do modelo), tais como condições de contorno, topografia e resistividade do subsolo, a modelagem direta poderia ser aplicada na predição de dados, e.g., potenciais em subsuperfície. Isto se deve à existência de leis que regulam os fenômenos físicos envolvidos, a saber: as equações de Maxwell e a lei de Ohm. Do ponto de vista computacional, as equações diferenciais que resultam da conjunção destas leis devem ser discretizadas (COCKETT; HEAGY; OLDENBURG, 2016). Num modelo 2D a Terra é parametrizada em blocos ou *grids* retangulares de resistividade constante que formam uma malha de regularização. Isto permite estabelecer que:

$$G[q] = d, \quad (9)$$



em que  $G$  é um operador que simula dados preditos ( $d$ ) a partir do conjunto de parâmetros discretizados do modelo  $q$  (distribuição de resistividades) (COCKETT et al., 2015).

Nos problemas geofísicos, todavia, os parâmetros do modelo não são conhecidos. Pelo contrário, o que se tem são dados observados na superfície,  $d_{obs}$ . Assim, procura-se encontrar os parâmetros do modelo que reproduzem estes dados observados, utilizando a inversão geofísica.

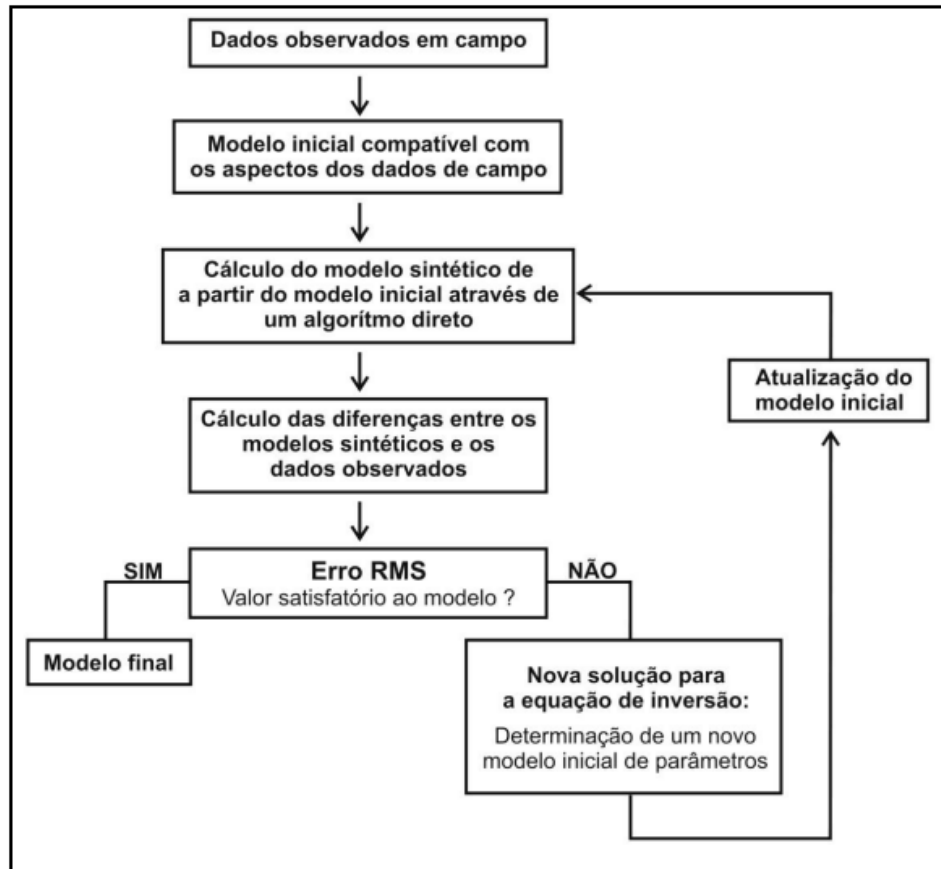
### 3.4.1. Método da Inversão

Ainda que os dados coletados em campo sejam finitos, a distribuição das propriedades físicas na Terra é contínua, o que nos leva a um problema mal-posto, sem solução única que se ajuste aos dados. Além disso, fatores como incertezas em medições, dificuldade na obtenção de determinados pontos, interferências por ruídos, por exemplo, podem influenciar negativamente estes dados. Desta forma, o problema da inversão não é apenas encontrar um modelo consistente numericamente, mas encontrar o melhor modelo, que também satisfaça o ambiente geológico particular (COCKETT et al., 2015). A inversão tem por finalidade, então, obter um modelo de distribuição dos parâmetros físicos da Terra similares à distribuição real, em subsuperfície.

A rotina de inversão de dados segue um algoritmo básico, como pode ser observado na Figura 11. Os dados de resistividade aparente medidos são plotados em pseudoseções, em escalas de profundidades não verdadeiras (pseudopfundidades). A rotina de inversão calcula os dados sintéticos da resistividade aparente, buscando um modelo de resistividade verdadeiro a cada iteração. O critério de parada do processo iterativo pode ser estabelecido de maneiras distintas. Um destes critérios determina que uma diferença percentual entre os erros RMS de duas iterações sucessivas seja menor que um valor aceitável.

O método dos mínimos quadrados é o mais empregado na inversão de dados de ER e IP, principalmente os métodos de inversão por suavização (*smoothness-constrained least squares*), utilizado pelo software empregado neste trabalho, e de inversão por blocos (*blocky inversion*), segundo Loke, Acworth e Dahlin (2003). De acordo com os autores, o primeiro método fornece ótimos resultados onde a geologia exhibe variações suaves, como em plumas de contaminação. No entanto, quando há transição brusca na resistividade do subsolo, como presença de diques, o segundo método pode ser mais eficiente.

Figura 11 – Algoritmo básico da rotina de inversão de dados



Fonte: Fachin (2007).

A inversão dos dados de resistividade é um problema não linear, que deve ser linearizado a partir de estimativas do modelo inicial (DEGROOT-HEDLIN; CONSTABLE, 1990; SASAKI, 1992).

Considerando que não é possível encontrar um único modelo de resistividades condizentes com os dados observados, para selecionar o melhor modelo é necessário valorá-los segundo a sua adequação ao perfil esperado. Isto pode ser feito estipulando uma função objetivo que se pretende minimizar (ELLIS; OLDENBURG, 1994). Os melhores modelos de resistividade terão os menores valores da função objetivo. Por exemplo, pode-se propor uma função da forma:

$$\phi(q) = \phi_d(q) + \lambda\phi_r(q), \quad (10)$$

sendo:

$$\phi_d(q) = \frac{1}{2} \|G[q] - d_{obs}\|^2, \quad (11)$$

$$\phi_r(q) = \frac{1}{2} \|Sq\|^2, \quad (12)$$

$\lambda$  é o multiplicador Lagrange ou fator de amortecimento (*damping*), e  $S$  uma matriz de regularização (COCKETT et al., 2015; SASAKI, 1992).

Cada uma das componentes da Equação (10) vai direcionar o processo de otimização em aspectos diferentes. A primeira componente penaliza modelos de resistividades que destoam dos dados observados e a segunda componente exclui os modelos que não satisfazem condições de regularização (suavidade e continuidade do perfil de resistividades) (COCKETT et al., 2015). Estas condições são codificadas na matriz  $S$ . O parâmetro  $\lambda$  configura a importância relativa de cada uma das componentes.

Tomando o gradiente da função objetivo e igualando a zero, temos:

$$J[q]^T(G[q] - d_{obs}) + \lambda Fq = 0, \quad (13)$$

sendo:

$$F = S^T S = \alpha_X C_X^T C_X + \alpha_Z C_Z^T C_Z,$$

$C_X$  e  $C_Z$  matrizes de suavização nas direções horizontal e vertical,

$\alpha_X$  e  $\alpha_Z$  os pesos relativos dos filtros de suavização nas direções X e Z.

A matriz jacobiana de derivadas parciais (sensitividade)  $J$  é definida por  $J_{nm} = \partial G_n / \partial q_m$ .

Por fim, aplicando o método de Newton para obter a solução  $q$  desta equação, temos:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T \Delta d - \lambda F q_{k-1}, \quad (14)$$

onde:

$\Delta d$  o vetor de desajuste dos dados, dado por  $d_{obs} - G[q_k]$ ,

$k$  é o número de iterações.

A solução final é obtida após alcançado o critério de parada do processo iterativo.

#### **4. ÁREAS DE ESTUDO**

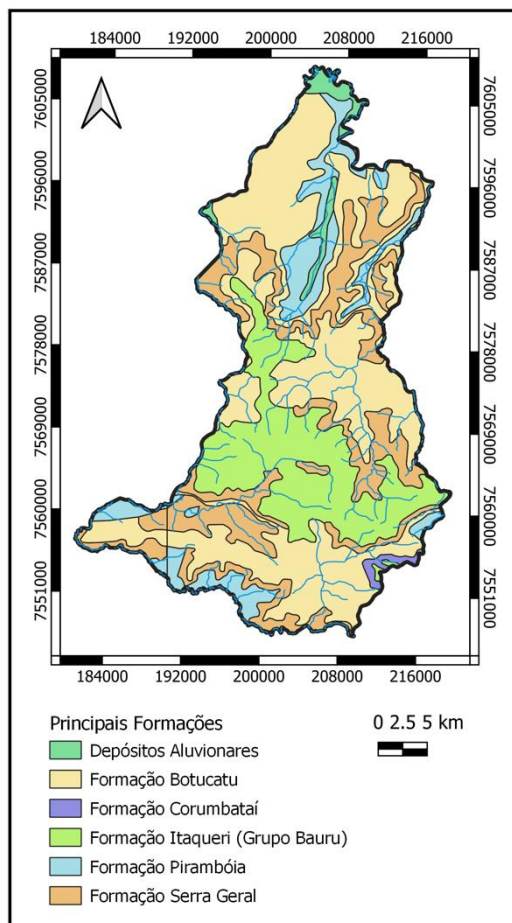
Foram selecionadas duas áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos para realização deste estudo: um lixão desativado e um aterro sanitário. Ambas as regiões estão localizadas no município de São Carlos/SP, a 260 km da capital e entre as coordenadas 22°30' e 21°30' latitude sul e 48°30' e 47°30' longitude oeste. Segundo informações do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São Carlos (FIPAI, 2020, p. 116), em 2018 o município produziu aproximadamente 186 toneladas de resíduo domiciliar por dia, o que corresponde a 0,78 kg/hab.dia para uma população de 249,5 mil habitantes. Estes resíduos são enviados ao aterro sanitário em estudo.

As duas regiões foram selecionadas devido às suas particularidades. O lixão desativado, método inadequado de disposição de resíduos, está localizado sobre sedimentos arenosos da Formação Botucatu, em área de recarga do mais importante aquífero do país. Por não ter sido concebido conforme as normas vigentes, poderia estar causando contaminação do solo e águas subterrâneas. Neste contexto, a geofísica pode ser aplicada para investigar plumas de contaminação. No aterro sanitário, método adequado de disposição, os ensaios geofísicos foram realizados no início de sua operação, durante a instalação das primeiras cavas de disposição de resíduos. Desta forma, a geofísica será aplicada como importante método para caracterização da área estudada, auxiliando na construção de um modelo geológico com grande volume de informações (SCHETTINI, 2016).

##### **4.1. Caracterização da região**

O município de São Carlos está situado no complexo geológico da Bacia intracratônica sul-americana do Paraná. A Bacia do Paraná se desenvolveu sobre crosta continental e é preenchida por rochas sedimentares, associadas a rochas magmáticas (FIPAI, 2020). A região é composta majoritariamente pelas Formações Geológicas Botucatu, Piramboia e Serra Geral, compondo o Grupo São Bento, e pelo Grupo Bauru, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Mapa geológico com as principais formações no município de São Carlos



Fonte: Autor (elaborado a partir do software QGIS).

#### 4.1.1. Formação Pirambóia

A Formação Pirambóia, cuja idade de formação compreende o Triássico Médio ao Jurássico, tem sua faixa de afloramento estendendo-se desde a divisa de Minas Gerais até o Paraná, com espessura máxima em torno de 300 metros, na Bacia do Tietê (SOARES, 1975). Em 1927, Pacheco denomina Pirambóia a Formação desenvolvida majoritariamente por arenitos, recoberta e injetada por diques e derrames de basalto e diabásio, representando o membro inferior do Triássico (MASSOLI, 2007).

O topo da Formação Pirambóia pode apresentar o início da Formação Botucatu, numa mudança litológica um tanto gradual, o que levou diversos autores a representarem, ainda na década de 70, as duas unidades como uma única unidade indivisa no Estado de São Paulo (GONÇALVES, 1986; MASSOLI, 2007).

Soares (1975) caracteriza a litologia da Formação por arenitos tipicamente vermelhos, de granulação média a fina. Sua porção inferior diferencia-se, normalmente, por fácies mais argilosa, com camadas de argila, folhelhos arenosos e sílticos, além de estratificação plano-paralela e cruzada. Já sua porção superior, ainda segundo o autor, é caracterizado por bancos de arenitos pouco a muito argilosos com estratificação cruzada, e bancos de arenitos muito argilosos com estratificação plano-paralela, presença de lamitos e argilitos arenosos.

Segundo estudo realizado por Wu e Chang (1992), os minerais pesados encontrados nesta Formação compreendem o zircão, a turmalina, a granada, a estauroлита, a biotita, a magnetita e ilmenita, dentre outros. Já os minerais leves componentes dos arenitos da Formação são o quartzo, o feldspato, fragmentos de rochas (principalmente sílex), mica.

#### *4.1.2. Formação Botucatu*

A Formação Botucatu, cujo limite superior de sua idade coincide com o início da fase mais intensa do vulcanismo, no limite Jurássico-Cretáceo, foi mencionada pela primeira vez em 1889 por Gonzaga de Campos, que a descreveu como arenitos moles vermelhos recobrimdo camadas paleozóicas, que alternavam em sua parte superior com basaltos (MASSOLI, 2007; SOARES, 1975).

A Formação pode ser descrita pela presença de arenitos avermelhados presentes nas partes sudeste e sudoeste do município, de granulação fina a média, grãos com alta esfericidade e superfície fosca, estratificação cruzada de grande e médio porte, muito friáveis ou silicificados, cuja presença de derrames basálticos é admitida (GONÇALVES, 1986; SOARES, 1975). Sua espessura é variável ao longo do Estado, mas não superior a 150 metros em sua faixa de afloramentos (MASSOLI, 2007). Uma característica desta unidade é a presença de arenitos com teor de lama (silte + argila) frequentemente inferior a 10% (SOARES, 1975).

Os minerais pesados encontrados na Formação, de acordo com estudo de Wu e Chang (1992), são os mesmos da Formação Pirambóia, entretanto encontram-se em porcentagens diferentes. A frequência do mineral magnético magnetita, por exemplo, é bem elevada em toda a área, variando de ultrapredominante a predominante. As características dos grãos minerais de quartzo, feldspato e fragmentos de rocha também são semelhantes à Formação anterior.

#### *4.1.3. Formação Serra Geral*

A Formação Serra Geral, no Estado de São Paulo, superpõe-se à Formação Botucatu e é sobreposta pelos grupos Bauru e Caiuá (FERNANDES; COIMBRA, 2000). Foi descrita por White, em 1908, como o conjunto de basaltos originados de extensa atividade magmática fissural, mantendo-se pequenos corpos de arenitos intercalados (SOARES, 1975). Estes arenitos apresentam as mesmas características daqueles presentes na Formação Botucatu. Atualmente, compreende-se que a Formação Serra Geral é representada também por diabásios intrudidos, que penetram as unidades sedimentares da Bacia do Paraná ou as cristalinas pré-cambrianas (GONÇALVES, 1986; MASSOLI, 2007).

Os derrames basálticos são formados por rochas de coloração cinza escura a negra e textura afanítica, com espessura individual que pode alcançar 100 metros (FERNANDES et al., 2010). A Formação é recoberta em discordância angular por formações que constituem o Grupo Bauru. Os basaltos são recobertos por estruturas areno-argilosas, de no máximo 10 metros de espessura, nas regiões da Depressão Periférica e das Cuestas Basálticas, que englobam as regiões de São Carlos, Rio Claro, Piracicaba e adjacências (FACINCANI, 2000). Fernandes et al. (2010) destacam a presença de diques e sills cortando sedimentos em trechos das Formações Corumbataí, Pirambóia e Botucatu. Ainda, apontam a existência de sills e diques de diabásio em leitos dos rios Piracicaba, Corumbatai, Feijão, Itaqueri.

#### *4.1.4. Grupo Bauru (Formação Itaqueri)*

Facincani (2000) apresenta o grupo Bauru como uma sequência continental que engloba fácies de leques aluviais, lacustres, fluviais e eólica. Na região de estudo, o Grupo é representado pela Formação Itaqueri, cuja cobertura sedimentar pós-basáltica é caracterizada por arenitos de granulação média a conglomeráticos, com grãos angulosos e ricos em feldspatos, podendo apresentar estratificação cruzada (raro) (GONÇALVES, 1986).

A Formação possui contato basal com a Formação Serra Geral e, por vezes, repousa sobre a Formação Botucatu. Segundo Facincaci (2000), predominam conglomerados na porção basal de maior parte da Formação.

O Grupo Bauru na região de São Carlos, de acordo com Gonçalves (1986), é melhor representado pela existência de arenito médio bem graduado, grãos angulosos, cuja

porcentagem de areia é de 45% e argila 35%. A argila característica é de cor vermelha a rosada, com partículas de feldspato como pontos brancos no material.

#### *4.1.5. Abastecimento hídrico da região*

No município de São Carlos afloram aquíferos de grande importância: Serra Geral, Bauru e Guarani. O Aquífero Serra Geral, formado por rochas impermeáveis originadas por derrames basálticos da Formação Serra Geral e intrusões diabásicas, tem sido bastante explorado na região (FIPAI, 2020). O Aquífero Bauru, constituído por rochas sedimentares dos Grupos Bauru e Caiuá, alimenta diversas nascentes na área urbana de São Carlos, cuja recarga vem diretamente de precipitação pluvial (CETESB, 2019), assim também o Serra Geral. O Aquífero Guarani, delimitado por derrames básicos da Formação Serra Geral em seu topo e rochas do Grupo Passa Dois em sua base (GESICKI, 2007), é considerado o maior manancial de água doce subterrânea do mundo, compreendendo também o Paraguai, o Uruguai e a Argentina, e pode ser considerado o aquífero mais importante para o município (FIPAI, 2020).

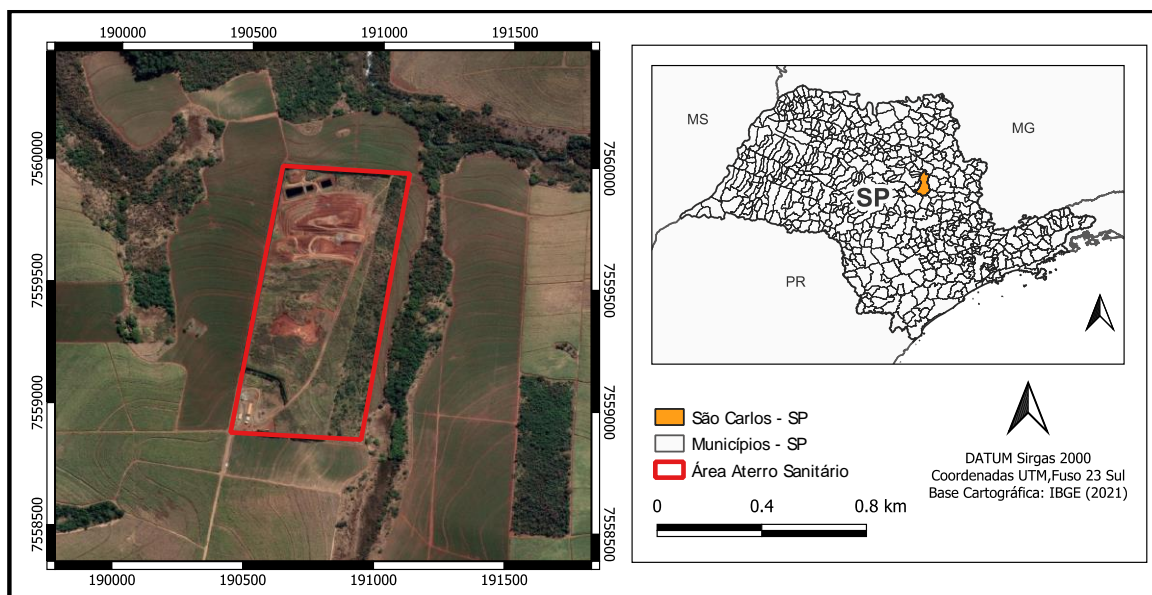
Segundo informações do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São Carlos (FIPAI, 2020, p. 116), o serviço de abastecimento de água no município, fornecido pelo Serviço Autônomo de Água e Esgotos - SAAE, é realizado a partir da captação das fontes superficiais e subterrâneas. As fontes superficiais localizam-se em dois pontos: Córrego do Monjolinho e Ribeirão do Feijão, enquanto a captação subterrânea ocorre em poços profundos no Aquífero Guarani. O último representa cerca de metade da água distribuída pelo órgão (PERRONI; WENDLAND, 2008).

## **4.2. Aterro Sanitário de São Carlos**

O Aterro Sanitário Municipal de São Carlos se encontra entre os municípios de São Carlos e Ribeirão Bonito (Figura 13), entre as coordenadas 22°02'51,460'' e 22°02'14,524'' latitude sul e 47°59'56,080'' e 47°59'32,648'' longitude oeste. O aterro, cujo início das operações ocorreu em 2013, está a 25 km do centro de São Carlos, em uma área rural cujo acesso é feito pela rodovia Luiz Augusto de Oliveira SP-215, no km 162. Possui área equivalente a 565.685,33 m<sup>2</sup>, capacidade para receber aproximadamente 1.944.502 toneladas de resíduos sólidos domiciliares e vida útil mínima de cerca de 22 anos (GALDEANO, 2016, p. 8), mas com capacidade estimada segundo a empresa São Carlos Ambiental (FIPAI, 2020) para operar até 2038.



Figura 13 - Mapa de localização do aterro sanitário de São Carlos

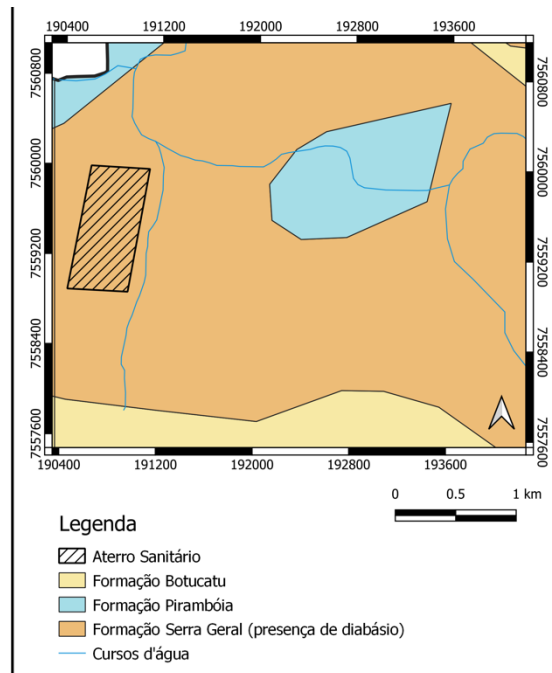


Fonte: Autor (elaborado a partir do software QGIS).

Esta região está sobre a Formação Serra Geral, com predominância de rochas vulcânicas básicas – basaltos (principalmente) e diabásios (RICCOMINI, 1997), com espessura máxima de 70 metros. Apesar de mapeamentos em escalas da ordem de 1:250.000 existentes apontarem para presença de basaltos no município, o mapeamento de campo realizado durante a elaboração do relatório de impacto ambiental (RIMA) pela empresa responsável, em 2009, caracterizou a rocha básica aflorante no local do aterro como diabásio (Figura 14). Também foi observado na área de estudo afloramento de arenito avermelhado de grãos foscos, granulometria fina a muito fina, que certamente se referem à Formação Botucatu (FIPAI, 2010).

Os solos que predominam na área do aterro são majoritariamente os Latossolos Vermelhos, solos que apresentam baixa erodibilidade, seguidos dos Gleissolos Hápicos (FIPAI, 2010) (FIPAI, 2010).

Figura 14 - Mapa geológico da área onde foi instalado o aterro sanitário



Fonte: Autor (elaborado a partir do software QGIS).

A área do aterro está inserida na bacia hidrográfica do Rio Monjolinho, na Macro bacia Tietê-Jacaré. Os aquíferos presentes nesta região são o Aquífero Guarani e o Aquífero fissurado da Formação Serra Geral, este último sendo representado por diabásios cujo armazenamento e transmissão de água se dão por sistemas de fraturas na rocha, segundo o relatório do RIMA (FIPAI, 2010). Apesar do aquífero Guarani ter grande importância neste estudo, por ser o principal responsável pelo abastecimento público do município, encontra-se a profundidades próximas a 70 metros e são capeados por rocha cristalina da Formação Serra Geral, ainda segundo relatório do RIMA, tornando-o totalmente protegido. Concluem, por fim, os responsáveis pelo relatório, que o risco de contaminação dos aquíferos, em relação ao grau de vulnerabilidade, é considerado desprezível.

### 4.3. Lixão desativado de São Carlos

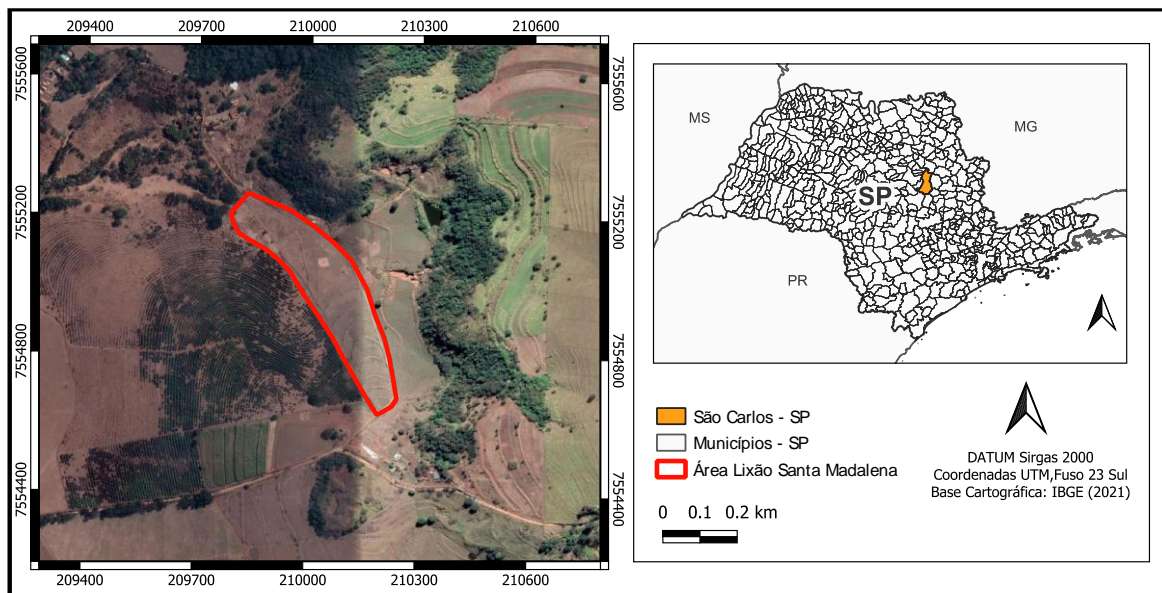
O lixão desativado foi a área utilizada pela Prefeitura Municipal da cidade, de forma inadequada, para a disposição de resíduos urbanos na cidade de São Carlos entre os anos 1980 e 1996. Região de voçoroca de grandes dimensões, foi instalado sem estruturas de drenagem para coleta de líquidos percolados e gás, sem impermeabilização da base do lixão e sem cobertura (SHINZATO, 2014). O local foi utilizado para disposição de resíduos residenciais,

comerciais, industriais e de serviços de saúde. Em 1990 os resíduos de saúde passaram a ser incinerados (GADOTTI, 1997).

A área apresenta grande vulnerabilidade a contaminações de águas superficiais e subterrâneas, uma vez que exhibe características desfavoráveis para disposição de resíduos. Segundo Zuquette e Gandolfi (1991), o nível da água subterrânea varia entre uma profundidade mínima de 1,97 metros e máxima de 8,7 metros; a região apresenta arenitos permeáveis com poucos finos de alta permeabilidade; os materiais inconsolidados são majoritariamente arenosos; e o solo possui alto potencial a erosão. Diversos estudos realizados anteriormente já apontavam contaminações das águas subterrâneas pelo lixiviado proveniente do lixão (GADOTTI, 1997; MENEZES, 1995; VELOZO, 2006).

Localiza-se cerca de 20 km do centro da cidade, na Fazenda Santa Madalena, cujo acesso é realizado pela antiga estrada São Carlos-Analândia, pela Rodovia Washington Luiz SP 310, coordenadas  $22^{\circ}05'0,025''$  e  $22^{\circ}05'22,739''$  latitude sul e  $47^{\circ}48'45,909''$  e  $47^{\circ}48'28,960''$  longitude oeste (mapa de localização apresentado na Figura 15). Está inserido na Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí (VELOZO, 2006).

Figura 15 - Mapa de localização do lixão desativado de São Carlos

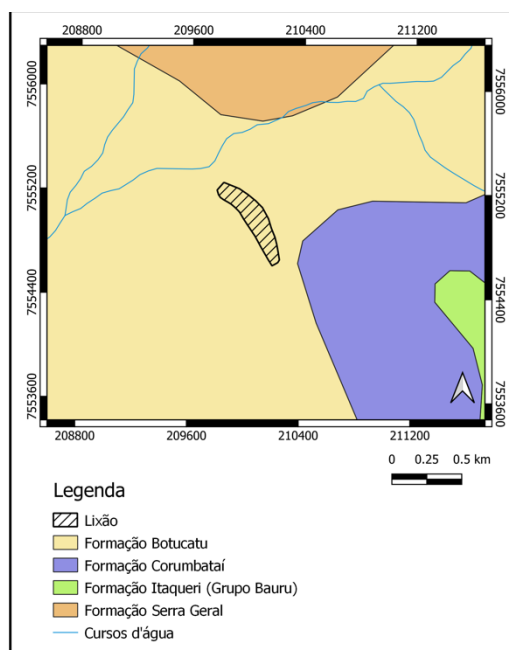


Fonte: Autor (elaborado a partir do software QGIS).

A região da cava tem aproximadamente 600m de comprimento por 100m de largura e possui um volume total aproximado de 440.000m<sup>3</sup> de resíduos (PELINSON; OLIVEIRA; WENDLAND, 2019).

O lixão desativado está localizado na parte leste da Bacia do Paraná, sobre a Formação Botucatu (Figura 16). Predominam na área de estudo arenitos avermelhados a amarelados, de granulação fina a média, grãos arredondados a bem arredondados na fração grossa e subangulares a arredondados na fração fina, alta esfericidade e muito friáveis ou silicificados (VELOZO, 2006). A cobertura do lixão foi realizada empregando, principalmente, solo residual da Formação Serra Geral – que ocorre próximo à área de estudo (SHINZATO, 2014).

Figura 16 - Mapa geológico da área onde foi instalado o lixão



Fonte: Autor (elaborado a partir do software QGIS).

Os solos que predominam na área de estudo são os Latossolos Vermelhos e Areia Quartzosa Profunda. A partir de poços de monitoramento presentes no local, verificam-se presença de areia fina siltosa e areia fina/média amarela, principalmente, nas adjacências da cava de resíduos.

O lixão está inserido na bacia do Feijão, Macrobaía do Tietê-Jacaré, responsável por 40% do abastecimento da água do município e área de recarga do Aquífero Guarani (VELOZO, 2006). O antigo lixão está inserido, ainda, em um dos mais importantes mananciais de água subsuperficial do estado, o Aquífero Botucatu, em sua principal área de recarga. Métodos

diretos de construção de piezômetros, empregados por Gonçalves et al. (1992), revelaram a direção do fluxo freático para NW. De acordo com os autores, parte do chorume produzido pelo lixão poderia estar infiltrando para o aquífero profundo, devido ao fluxo preferencial do freático, aliado à alta permeabilidade do substrato local.

## 5. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS EM CAMPO

Os métodos utilizados na aquisição de dados geofísicos, eletrorresistividade e polarização induzida, foram realizados a partir da técnica de caminhamento elétrico (CE) em ambas as áreas de estudo. A aquisição de dados de IP é muito semelhante à de resistividade aparente. Os equipamentos utilizados para os ensaios de IP normalmente adquirem simultaneamente medidas de resistividade.

O tratamento e processamento destes dados foi feito no software RES2DINV. Ensaios diretos SPT também foram realizados no aterro sanitário, num período anterior à execução da primeira cava.

### 5.1. Aterro Sanitário de São Carlos

Os dados geofísicos foram obtidos através do resistímetro Syscal Pro, desenvolvido pela empresa *IRIS Instruments* (Figura 17), patrimônio da Universidade de São Paulo. O equipamento possui 10 canais e funções Tx e Rx no domínio do tempo. São utilizados também uma fonte controlada para emissão de corrente elétrica (eletrodos metálicos), medidores de potencial elétrico (eletrodos não polarizáveis/porosos), bateria de 12 V, cabos para conexão dos eletrodos, solução saturada de sulfato de cobre diluída em água para os eletrodos não polarizáveis, soluções de NaCl para os eletrodos metálicos, marretas, martelos e trena.

Figura 17 – Esquema de utilização do equipamento Syscal Pro, com conversor e bateria, empregado no levantamento das linhas de caminhamento elétrico



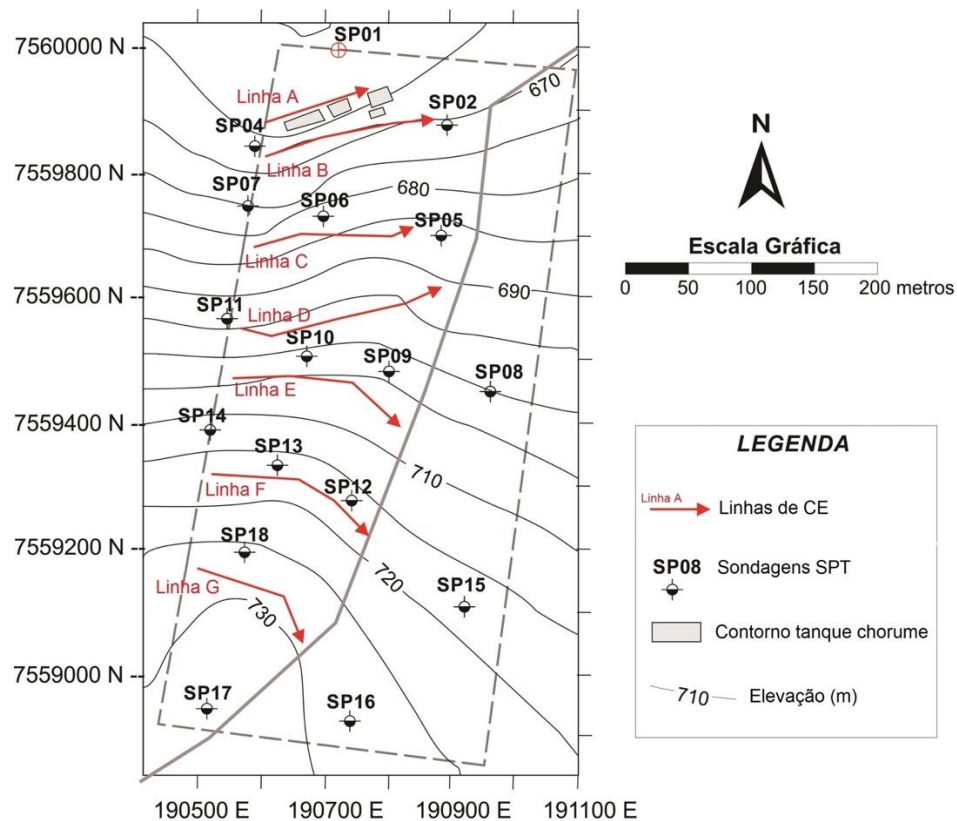
Fonte: Autor.

### 5.1.1. Caminhamento Elétrico

Foram realizadas 7 linhas de caminhamento elétrico durante a fase inicial de implantação do aterro sanitário, em 2014, período em que também se iniciava a escavação da primeira vala para disposição dos resíduos urbanos. Nenhuma linha de caminhamento elétrico foi realizada no local de escavação.

As linhas de CE foram orientadas de oeste para leste, cobrindo toda a área onde serão dispostos os resíduos (Figura 18). As linhas A e B foram instaladas próximas ao tanque de chorume.

Figura 18 - Localização das linhas de caminhamento elétrico no aterro sanitário, e informações complementares



Fonte: Autor.

O arranjo utilizado foi do tipo dipolo-dipolo, com espaçamento de 10 metros entre eletrodos. As linhas foram executadas em extensões distintas, variando entre 160 e 320 metros. O posicionamento das linhas de CE foi feito através do GPS topográfico de precisão GTR G2 da TechGeo. A topografia de cada ponto foi registrada usando a Rover (GPS móvel).

Foram obtidos dados dos parâmetros físicos resistividade e cargabilidade. A leitura do parâmetro físico resistividade foi realizada em até 10 canais simultaneamente. A profundidade alcançada na medida deste parâmetro foi de até 17 metros. A aquisição dos dados do parâmetro cargabilidade foi realizado no domínio do tempo, com janela de integração de 2 segundos, *delay time* de 0,2 s, empilhamento mínimo de 5 leituras e máximo de 15 e desvio padrão menor que 3%.

### 5.1.2. Ensaios de Campo – Sondagem SPT

Durante investigação da área de implantação do aterro sanitário foram realizados 17 furos de sondagem SPT, na região que será instalada a cava de resíduos e na região adjacente – ver Figura 18. Os dados obtidos do ensaio mostraram profundidades do topo da rocha variando entre 10 e 18 metros (Tabela 2).

Tabela 2 - Coordenadas UTM da localização das sondagens SPT e resultados da profundidade do impenetrável

SPT	Coordenada X	Coordenada Y	Profundidade do impenetrável (m)
01	190728,408	7559995,977	13,58
02	190900,404	7559868,406	17,38
03	190711,886	7559885,780	18,73
04	190584,182	7559839,479	14,83
05	190871,331	7559690,988	10,38
06	190702,492	7559728,603	12,65
07	190567,058	7559748,018	10,32
08	190964,347	7559434,304	12,19
09	190677,728	7559506,842	12,22
10	190535,594	7559549,485	14,49
11	190743,881	7559269,047	13,53
12	190628,756	7559333,864	14,23
13	190506,149	7559384,185	10,55
14	190915,395	7559109,423	12,13
15	190745,216	7558930,313	16,12
16	190515,778	7558937,902	18,08
17	190573,517	7559189,870	11,07

Os relatórios das sondagens descrevem solos argilosos, variando de argila siltosa pouco arenosa, marrom avermelhada, a argila silto-arenosa, marrom amarelada (SCHETTINI, 2016). Ensaios de permeabilidade também foram realizados nos mesmos locais onde foram feitos



cinco furos de sondagens, e os resultados apontaram para permeabilidade entre  $1,54 \times 10^{-5}$  e  $3,33 \times 10^{-5}$ .

Construir um modelo de profundidade do impenetrável num terreno de dimensões 1100 x 700 metros, com apenas 17 furos de sondagem, pode acarretar equívocos e gastos extras na execução do empreendimento, principalmente se o relevo e topo da rocha forem irregulares. Entretanto, aliar as informações de métodos diretos e métodos geofísicos (indiretos) permite a construção de um modelo mais real. Por esta razão, os dados da sondagem foram utilizados na elaboração de mapas de profundidades, que integram também as profundidades obtidas a partir das seções de caminhamento elétrico geradas.

### 5.1.3. *Elaboração de mapas de profundidade com auxílio do software Surfer*

Foram elaborados mapas de profundidades para avaliar a importância dos métodos geofísicos empregados na caracterização da área. O primeiro mapa foi construído com as profundidades do impenetrável (sondagem SPT). São estes dados normalmente utilizados pelos engenheiros, geólogos ou responsáveis, na avaliação da área de instalação do aterro. Em seguida, foram elaborados dois mapas com os dados obtidos a partir da geofísica, buscando compreender as maiores variações entre os dois ensaios (direto e indireto) e a elevação do topo da rocha e sua possível influência do fluxo de águas. Por fim, foram combinados os dados de ambas as sondagens, com o objetivo de criar um modelo mais real do terreno investigado. Para tal, todos os mapas foram desenvolvidos com auxílio do software Surfer.

#### 5.1.3.1. *Surfer*

O Surfer é um pacote de programas desenvolvidos pela Golden Software Inc., utilizado no mapeamento baseado em grades regulares (grids), que calculam os valores nos nós com base em valores de pontos já amostrados, interpolando dados XYZ. Podem ser produzidos a partir do software mapas de contorno, de relevo, de representação tridimensional, entre outros (GOLDEN SOFTWARE, 2021).

Para confecção dos mapas, é necessário utilizar um método de interpolação de valores, uma vez que são obtidos, geralmente, apenas informações pontuais no local de estudo. São diversos os métodos de interpolação das curvas de nível dos dados disponíveis no software. Foi utilizado neste trabalho o método de estimativa por *krigagem*.

Segundo Landim (2000), a *krigagem* é um método geoestatístico que considera as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas – que devem conter certa continuidade espacial para que os dados possam ser usados na parametrização da estimação dos pontos, nos locais em que as variáveis possuem valores desconhecidos. São utilizadas distâncias ponderadas e estimação por médias móveis. Uma das vantagens deste método, ainda segundo o autor, é a interpolação exata, cujos valores estimados para os nós correspondem exatamente ao valor amostrado na posição.

## **5.2. Lixão Desativado de São Carlos**

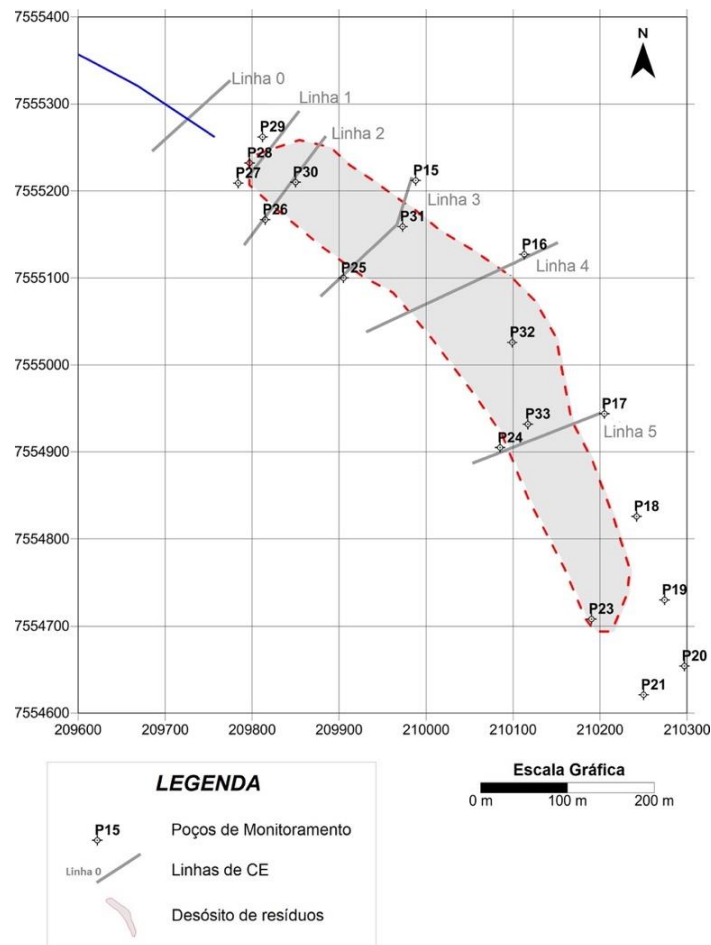
Para avaliação do lixão, foi utilizado resistivímetro desenvolvido pela empresa IRIS Instruments, através do equipamento Iris Syscal R2. Os equipamentos auxiliares utilizados nestes levantamentos foram: bateria de 12 V, eletrodos metálicos e eletrodos não polarizáveis, cabos para conexão dos eletrodos, de injeção de corrente e de medida de potencial, solução saturada de sulfato de cobre e NaCl, marretas, martelos e trena.

### *5.2.1. Caminhamento Elétrico*

Foram realizadas 6 linhas de caminhamento elétrico, distribuídas ao longo da região do lixão, já desativado à época de realização dos ensaios geofísicos (Figura 19). As linhas 1, 2, 3, 4 e 5 passam por poços de monitoramento anteriormente instalados na região. As linhas 0 e 1 foram posicionadas a jusante do lixão, para compreender como a contaminação se comporta nas adjacências. Todas as linhas foram posicionadas na direção NE-SW, perpendicularmente ao corpo do lixo e à possível direção preferencial do fluxo subterrâneo.

Foi utilizado o arranjo do tipo dipolo-dipolo, com espaçamento de 10 metros entre eletrodos. A profundidade teórica alcançada, no último nível, é de 30 metros. Os parâmetros físicos resistividade e cargabilidade foram obtidos. A leitura do parâmetro físico resistividade foi realizada em até 10 canais simultaneamente. A aquisição dos dados do parâmetro cargabilidade foi realizado no domínio do tempo, com janela de integração de 2 segundos, *delay time* de 0,2 s, empilhamento mínimo de 5 leituras e máximo de 15 e desvio padrão menor que 3%.

Figura 19 - Localizações das linhas de caminhamento elétrico no lixão e dos poços de monitoramento



Fonte: Autor.

### 5.3. Interpretação e processamento dos dados obtidos em campo

Os valores obtidos pelos ensaios geoeletricos, para ambos os parâmetros resistividade e cargabilidade, podem ser plotados num único diagrama bidimensional, através de pseudoseções. Estes resultados são, por vezes, utilizados na interpretação qualitativa dos dados geofísicos. A análise das pseudoseções pode ser útil na identificação, diferenciação e delimitação de zonas anômalas dos dados, mas também na interpretação do subsolo quando as camadas não são muito variáveis (GRIFFITHS; KING, 1981; NETO, 2015). Este tipo de modelagem pode ser realizada com auxílio de programas computacionais, como o software RES2DINV, que calculam as resistividades pelos métodos de diferenças finitas (FD) ou por elementos finitos (FE) (AARHUS GEOSOFTWARE, 2022). As pseudoseções obtidas apresentam valores de resistividade e cargabilidade aparentes, tanto na magnitude quanto na profundidade dos pontos investigados (SUMNER, 1976), podendo levar a interpretações

equivocadas. Por isso, para que sejam obtidas seções “reais”, um processo de inversão deve ser realizado.

### 5.3.1. Software RES2DINV

Os dados de campo coletados no aterro sanitário e no lixão foram processados e invertidos no software RES2DINV. Segundo o manual do programa (AARHUS GEOSOFTWARE, 2022), é utilizada a técnica de inversão bidimensional (2D) pelo método dos mínimos quadrados de Gauss-Newton, com suavização não linear, cujo método é baseado na Equação (14).

O programa utiliza os parâmetros do modelo ( $q$ ) de forma a reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente calculados e medido. O processo ocorre de forma automática e o usuário não necessita fornecer um modelo inicial. Uma medida desta diferença é dada pelo erro RMS (*root-mean-squared*). Entretanto, um menor erro RMS nem sempre representa de forma realista o modelo geológico. O programa testa a convergência do modelo a partir de dois métodos. O primeiro considera a mudança relativa do erro RMS entre 2 iterações – 5% por padrão. O segundo considera o próprio erro de ajuste dos dados, definindo a porcentagem de erro RMS onde o programa irá parar após apresentar valor RMS menor que este limite estabelecido.

O número máximo de iterações para convergência do modelo pode ser definido pelo usuário, mas o programa usa, por padrão, o número máximo de 5 iterações. Foram utilizadas neste estudo 5 iterações para o aterro e entre 5 e 10 iterações para o lixão.

O programa também permite que a topografia do relevo seja inserida na modelagem. Desta forma, uma vez que, em ambas as áreas de estudo, foram obtidas as coordenadas dos pontos ao longo das linhas de caminhamento, as seções foram criadas em conjunto com a topografia.

Os valores da escala de cores de resistividade e cargabilidade foram alterados. Foram construídas escalas de cores que fossem capazes de apresentar o melhor comportamento frente às diferenças de parâmetros entre cada seção. Para os dados do lixão o desafio foi maior, uma vez que determinadas seções apresentaram resistividades muito baixas, enquanto outros perfis apresentavam comportamento contrário. Entretanto, esta uniformização das escalas de cores é útil na comparação das seções e interpretações.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados os resultados dos caminhamentos elétricos realizados no aterro sanitário e no lixão desativado, para seções de resistividade e cargabilidade, gerados a partir do software RES2DINV. Os mapas de profundidade gerados a partir do *Surfer*, para dados do aterro sanitário, também são apresentados nesta seção.

### 6.1. Aterro Sanitário de São Carlos

Para cada linha foram gerados, com auxílio do software RES2DINV, os perfis invertidos de resistividade e de cargabilidade, totalizando 14 seções. As seções de caminhamento elétrico da linha E apresentaram valores incompatíveis com todas as demais seções, o que sugere erro durante a aquisição, e não foram consideradas nesta análise.

Como apresentado em capítulos anteriores, a geofísica pode ser importante ferramenta de caracterização de áreas em que se deseja instalar um aterro sanitário, complementando métodos pontuais de prospecção do subsolo. Com base nisso, o principal objetivo deste estudo geofísico foi identificar a interface solo/rocha nas seções de resistividade, quando possível, certificando os resultados através das seções de cargabilidade. Isto pois, a investigação da área para instalação de aterro pressupõe conhecimento e delimitação das profundidades possíveis para escavação das cavas de resíduos. Ainda, buscou-se identificar a possível direção preferencial do fluxo de águas percoladas. Conhecer a direção do fluxo pode auxiliar na escolha da localização dos poços de monitoramento de águas superficiais e subterrâneas.

Os ensaios SPT, realizados em 2010 pela empresa responsável pelo empreendimento, forneceram informações sobre a profundidade do impenetrável e características dos solos. A partir dos dados obtidos pelas sondagens, não foi identificado nível do lençol freático até as profundidades investigadas. Por consequência, as profundidades alcançadas pelo ensaio geofísico também não indicam solo saturado. Desta forma, o solo residual presente, i.e., solo argiloso, não pode ser diferenciado nas seções de resistividade seguindo os valores apresentados na Tabela 1, uma vez que materiais não saturados tendem a apresentar ampla faixa de resistividade. Além disso, os diferentes teores de argila e areia podem variar significativamente estes valores.

Em todos os perfis, as cores azuladas representam baixos valores de resistividade e cargabilidade, enquanto altos valores destes dois parâmetros são representados por cores avermelhadas. Em todos os perfis de resistividade, o topo do diabásio foi identificado para valores superiores a 346 ohm.m. Os números de interações e erro RMS estão indicados em cada perfil.

As interpretações das seções de resistividade e cargabilidade serão apresentadas seguindo os perfis na direção S-N, ou seja, na seguinte ordem: Linha G → Linha F → Linha D → Linha C → Linha B → Linha A.

### **Linha G**

O topo do diabásio foi delimitado, segundo o perfil de resistividade da Figura 20, em elevações inferiores a 720 metros, ao longo de todo o comprimento da seção (linha azul tracejada), e caracterizado por resistividades superiores ao intervalo 346 ohm.m.

Valores de resistividade menores que 107 ohm.m são observados entre os 20 metros e 100 metros horizontais e elevações entre 717 metros e 725 metros. Estes intervalos menores de resistividade em região não saturada podem ser resultado de solo úmido. Esta hipótese não está relacionada à presença de lençol freático, mas à ocorrência de chuvas no período em que os ensaios foram realizados. As regiões de resistividade intermediária, entre 107 e 346 ohm.m, representam o solo seco.

Os dados de cargabilidade neste tipo de investigação são úteis para validar a interpretação da rocha no perfil de resistividade. Isto pois, apesar da resposta IP ser menos sensível na presença de solo seco, a cargabilidade tende a aumentar com o aumento da resistividade – comportamento observado na Figura 21. Os valores de cargabilidade, que delimitam o topo da rocha, iniciam em 27,3 mV/V.

Figura 20 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha G, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

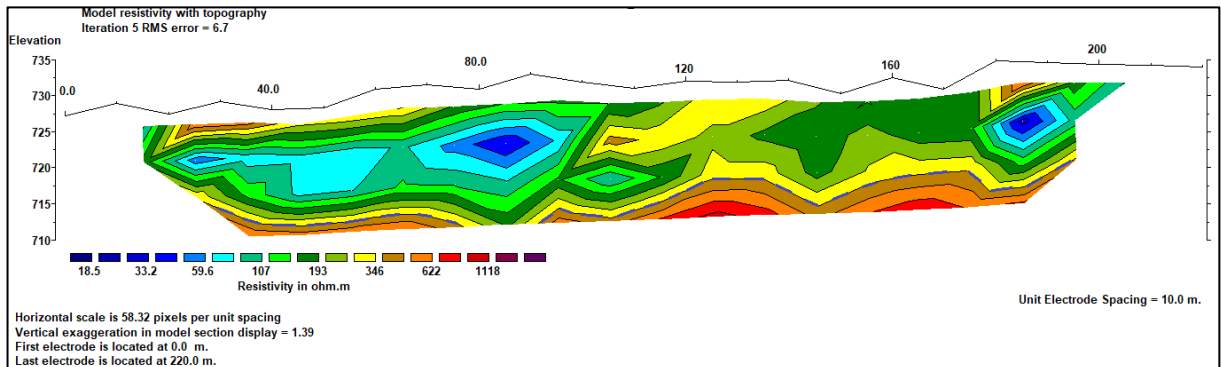
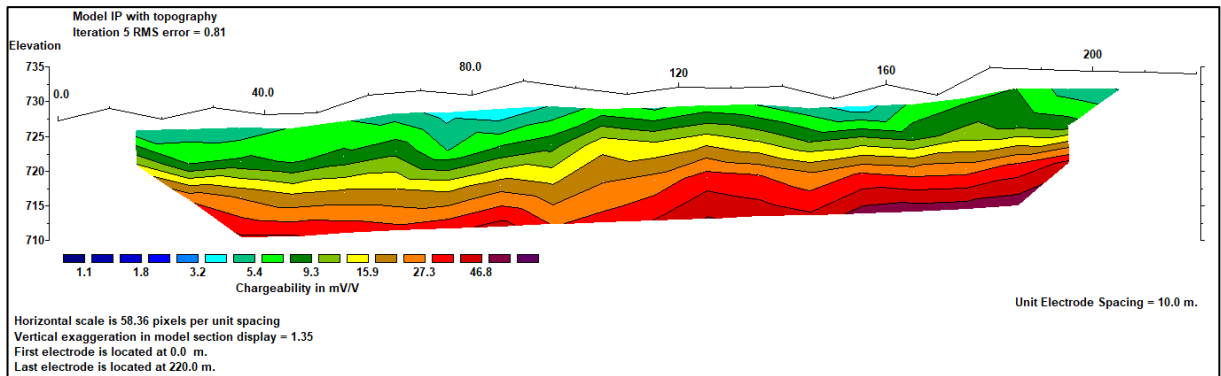


Figura 21 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha G, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



## Linha F

A linha F apresenta comportamento semelhante à anterior, porém o início da rocha corresponde a uma profundidade próxima ao limite da elevação da seção de caminhamento (maior que 700 metros), entre as posições de 30 a 70 metros. Nesta seção também é possível observar, entre as posições 180 e 260 metros e entre as posições 15 a 80 metros, na horizontal, baixos valores de resistividade, menores que 60 ohm.m. Novamente, estas regiões podem sugerir presença de solo úmido. De maneira geral, toda a variação de resistividade observada na seção da Figura 22 se deve, provavelmente, à variação de umidade e existência de solo seco.

Já no perfil de cargabilidade da Figura 23 não é possível observar comportamento similar à linha G, uma vez que o topo da rocha se encontra no limite da seção. Entretanto, ainda é possível observar um aumento dos valores de cargabilidade com a profundidade.

Figura 22 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha F, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

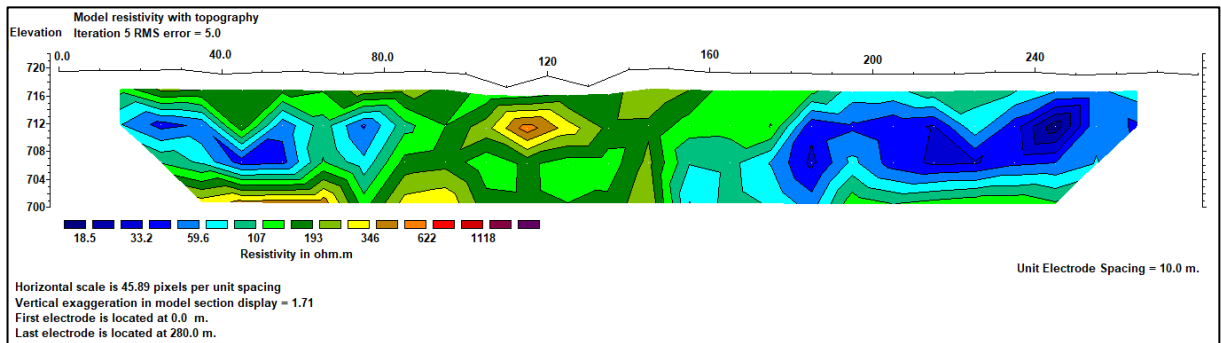
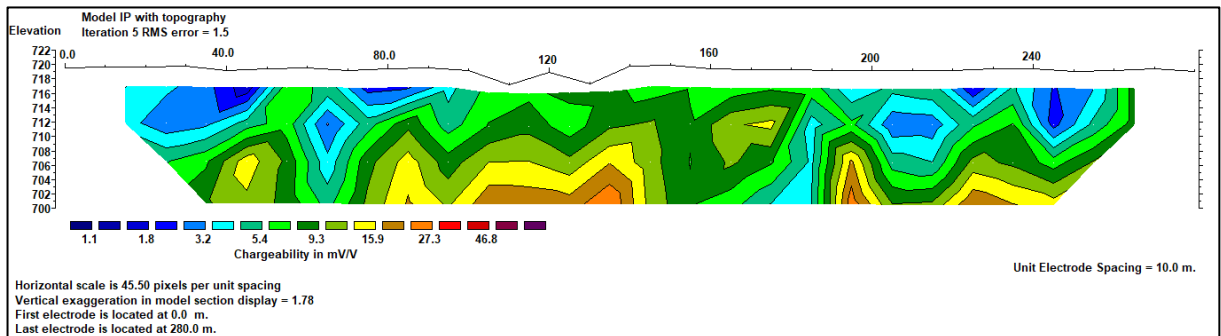


Figura 23 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha F, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



## Linha D

Nesta seção o topo do diabásio foi identificado por valores bem delimitados de resistividade, acima de 346 ohm.m (linha tracejada azul na Figura 24). A profundidade do topo rochoso, próximo aos 280 metros na horizontal, se encontra a aproximadamente 4 metros de profundidade, ou seja, muito próxima à superfície. A região de baixa resistividade (< 60 ohm.m), entre as posições 20 e 100 metros e 135 a 160 metros, na horizontal, também sugere presença de solo com maior umidade.

A seção de cargabilidade (Figura 25) apresenta valores que aumentam com a profundidade e com o aumento dos valores de resistividade. Este é o comportamento esperado em regiões que transicionam do solo para a rocha quando não há presença de contaminantes ou materiais heterogêneos. Os valores de cargabilidade, que delimitam o topo da rocha, variam entre 15,9 e 27,3 mV/V.



Figura 24 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha D, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

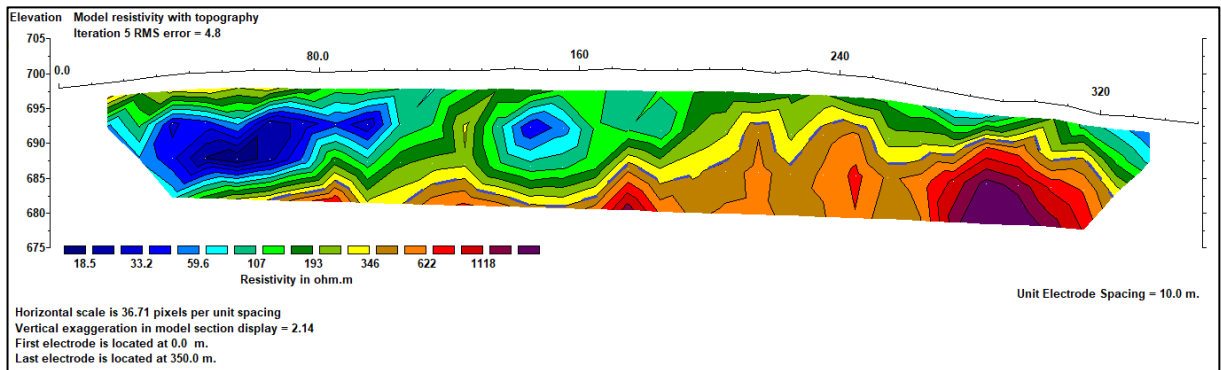
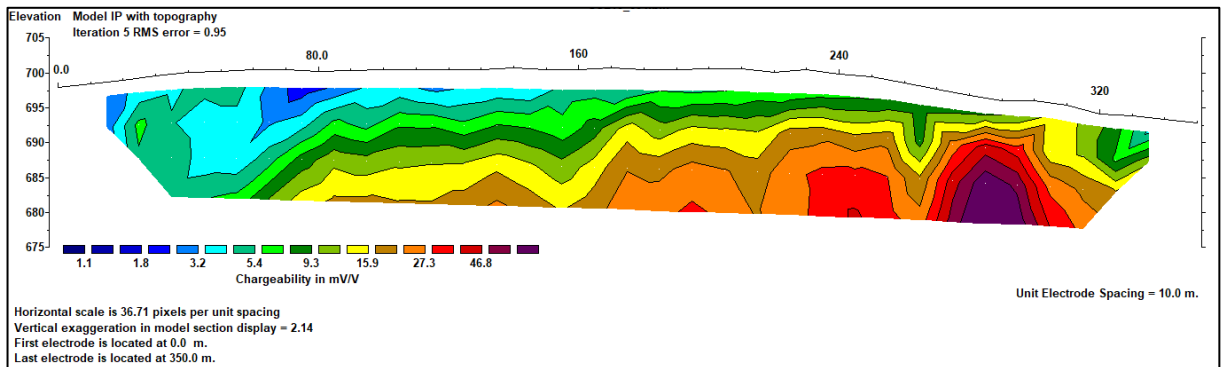


Figura 25 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha D, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



## Linha C

O topo da rocha foi delimitado na seção de resistividade da Figura 26 pela linha tracejada azul, iniciando em valores de resistividade acima de 346 ohm.m. As elevações variam entre 677,5 e 683 metros, para posições horizontais de 45 e 190 metros, respectivamente, o que corresponde a profundidades inferiores a 10 metros – chegando aos 5 metros na região mais superficial. Valores de resistividade abaixo de 107 ohm.m, nas porções mais superficiais, sugerem solo com maior umidade.

A seção de caminhamento elétrico para cargabilidade da Figura 27 segue o mesmo comportamento esperado das seções anteriores, onde a resposta IP aumenta com o aumento da resistividade, apresentando valores superiores a 9,3 mV/V.

Figura 26 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha C, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

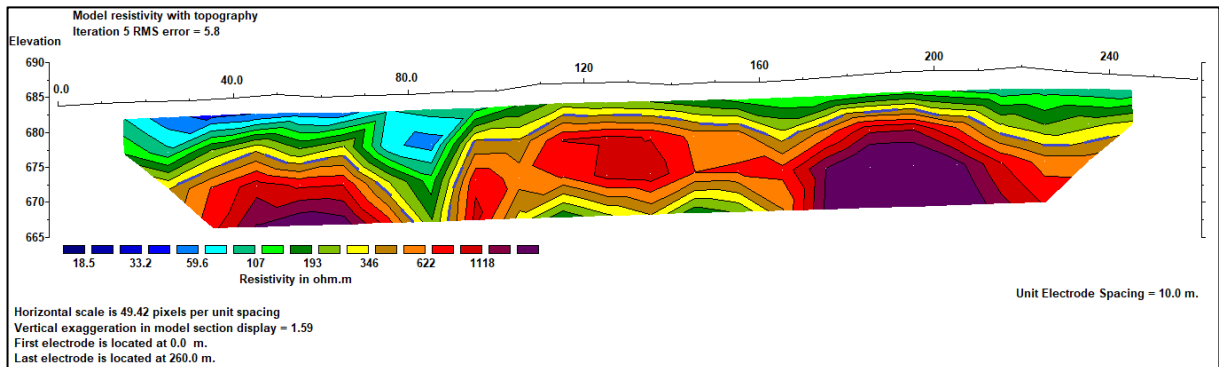
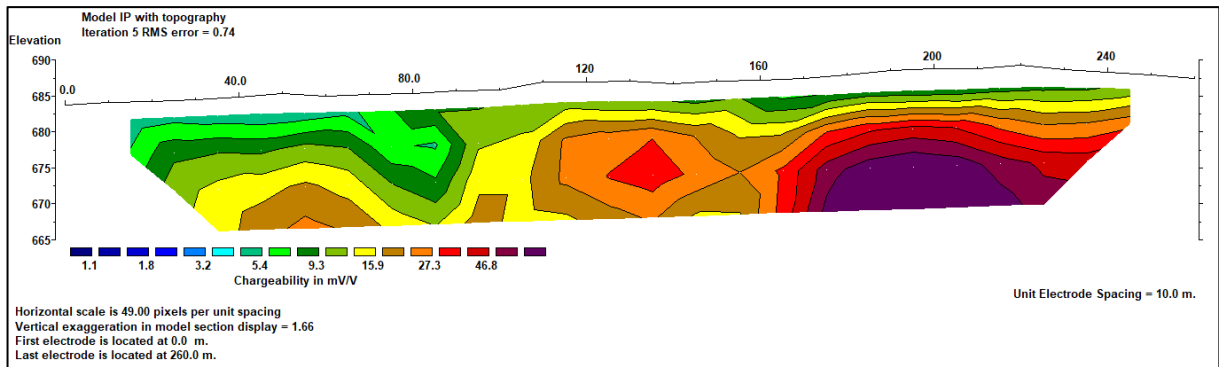


Figura 27 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha C, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



## Linha B

Nesta seção de caminhamento elétrico para resistividade da linha B, Figura 28, é possível observar o perfil do topo rochoso bem delimitado (linha azul tracejada), quase aflorando na posição horizontal 230 metros, marcado por valores de resistividade superiores a 346 ohm.m. Na porção à esquerda do perfil é possível observar também que a rocha alcança elevação superior a 665 metros. Na porção central da seção, entre os 110 e 190 metros horizontais, observam-se os menores valores de resistividade ( $< 60$  ohm.m). Assim como já discutido nas demais seções, esta é possivelmente uma região de maior umidade, ou de solo úmido.

Na seção da Figura 29 também se observam maiores valores de cargabilidade com o aumento da resistividade, seguindo a delimitação da rocha, porém com grandes variações nas elevações identificadas como topo da rocha (entre 5 e 103 mV/V). Entre as posições 230 e 240 metros na horizontal, aproximadamente, observa-se uma anomalia de baixa cargabilidade que se estende em profundidade. É possível que este seja um local de fratura na rocha, em que o mineral

magnético magnetita, presente no diabásio, pode estar sendo lixiviado. A ausência deste mineral ocasionaria menores respostas IP.

Figura 28 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha B, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

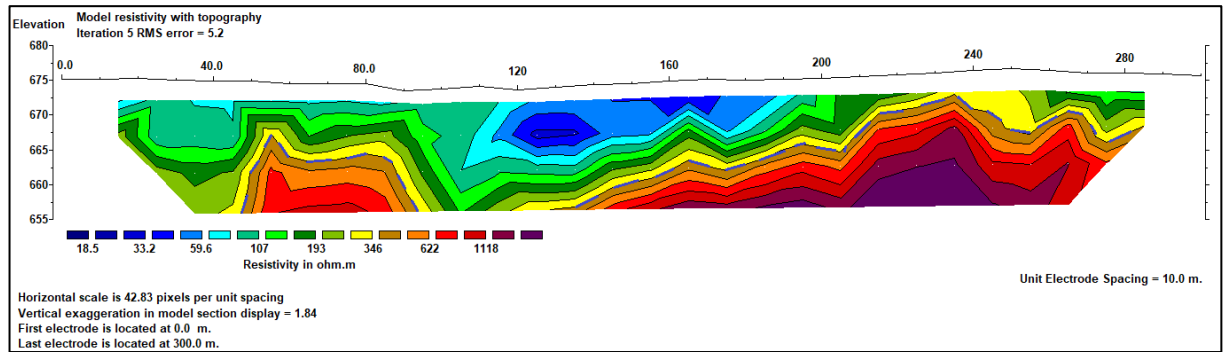
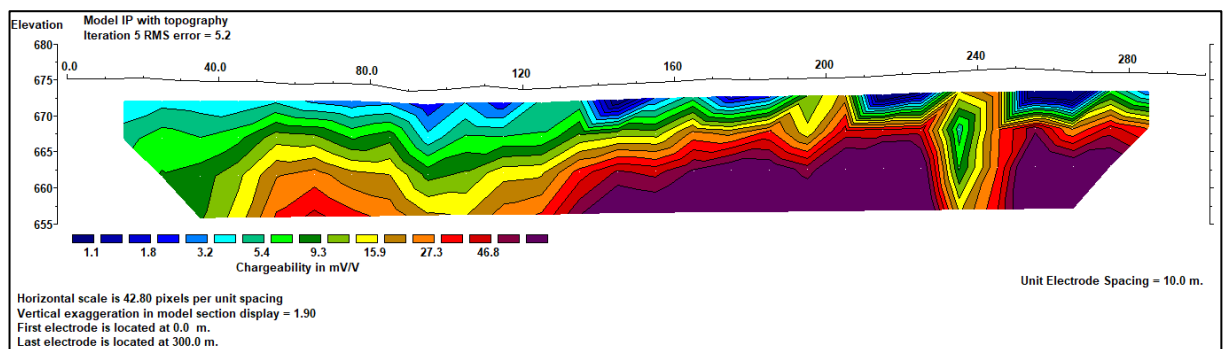


Figura 29 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha B, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



## Linha A

A seção de resistividade da Figura 30 é um perfil que apresenta altos valores de resistividades. O topo da rocha revela-se a partir de valores superiores aos 346 ohm.m (linha azul tracejada), na porção à direita da seção, entre os 105 e 155 metros na horizontal e elevação variando entre 652 e 665 metros aproximadamente. A seção de cargabilidade da Figura 31 também acompanha o aumento da resistividade e profundidade.

Foi observado, durante a escavação da primeira vala, em dezembro de 2013, presença de rocha a profundidades próximas à superfície (SCHETTINI, 2016). Este episódio não corresponde ao esperado, já que os valores encontrados somente a partir dos ensaios SPT, realizados nas proximidades desta linha, mostram o impenetrável, principalmente o SP-3, à profundidade de 18,7 metros. Já na caracterização geofísica, pelo perfil de resistividade, são identificadas

profundidades aproximadas de 5 metros nas posições próximas aos 140 metros, com profundidades maiores deslocando-se à região mais central.

Na porção à esquerda, entre 25 e 60 metros horizontais, e na porção central, entre 80 e 100 metros, observam-se também altos valores de resistividade. Estas regiões não foram identificadas como rocha, uma vez que o perfil de cargabilidade não exhibe o comportamento esperado, ou seja, o que se observam são baixos valores de cargabilidade e descontinuidade do traçado.

Ao observar-se, na Figura 18, como foram dispostas as linhas de caminhamento elétrico ao longo da região do aterro, identificam-se os tanques de chorume muito próximos à linha A. Esta proximidade pode ter causado interferência na aquisição dos dados, uma vez que na confecção destes tanques são utilizadas mantas de impermeabilização, que podem elevar os valores de resistividade. O ideal em situações como esta seria refazer a linha de caminhamento elétrico, resguardando uma distância maior dos tanques de chorume.

Figura 30 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha A, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

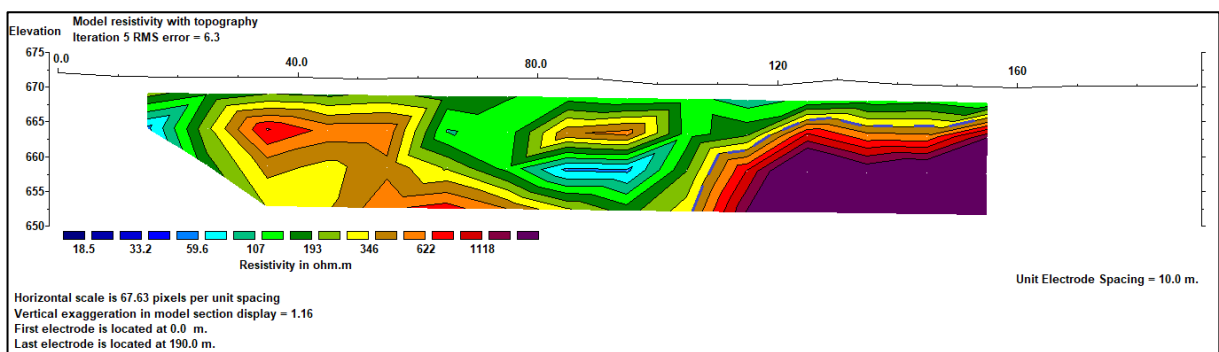
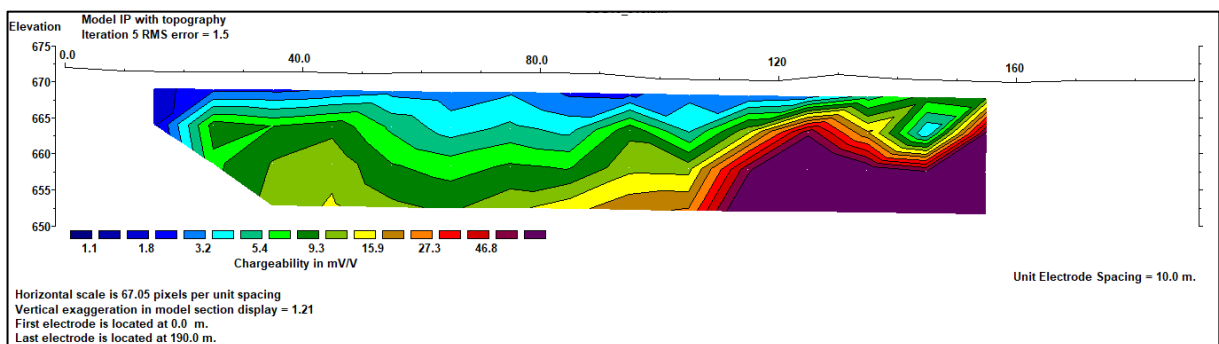


Figura 31 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha A, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



### *6.1.1. Conclusões sobre as interpretações das seções do Aterro Sanitário*

O objetivo do estudo no aterro sanitário, i.e., demonstrar como a geofísica pode auxiliar na investigação preliminar de áreas para disposição de resíduos, identificando neste caso o topo da rocha para realização das escavações, mostrou-se eficaz. As seções de resistividade foram utilizadas como método de identificação do diabásio e as seções de cargabilidade como método auxiliar.

Observou-se, em todas as seções de resistividade, dificuldades para caracterização dos solos quando o meio não está saturado. Segundo Sumner (1976), a maior parte da corrente elétrica que passa pela rocha não mineralizada será transportada pela água em fraturas e pelos poros presentes, ou seja, para que a polarização induzida ocorra, é necessário que haja poros preenchidos por fluido. A identificação dos materiais, em termos litológicos, também não é possível através dos dados de resistividade (BRAGA, 2016). De maneira geral, como o solo seco pode não conduzir bem eletricidade, valores de resistividade são elevados e não há resposta IP suficiente.

O diabásio, por ser rocha muito pouco permeável, apresenta altos valores de resistividade – identificados neste estudo por resistividades superiores a 346 ohm.m. A aplicação do método de polarização induzida, como método auxiliar, foi importante para confirmar a presença da rocha em profundidade, com comportamento semelhante em todos os perfis: maiores valores de cargabilidade com aumento da resistividade e profundidade. Este comportamento pode ser resultado da presença do mineral magnetita, presente em rochas como o diabásio.

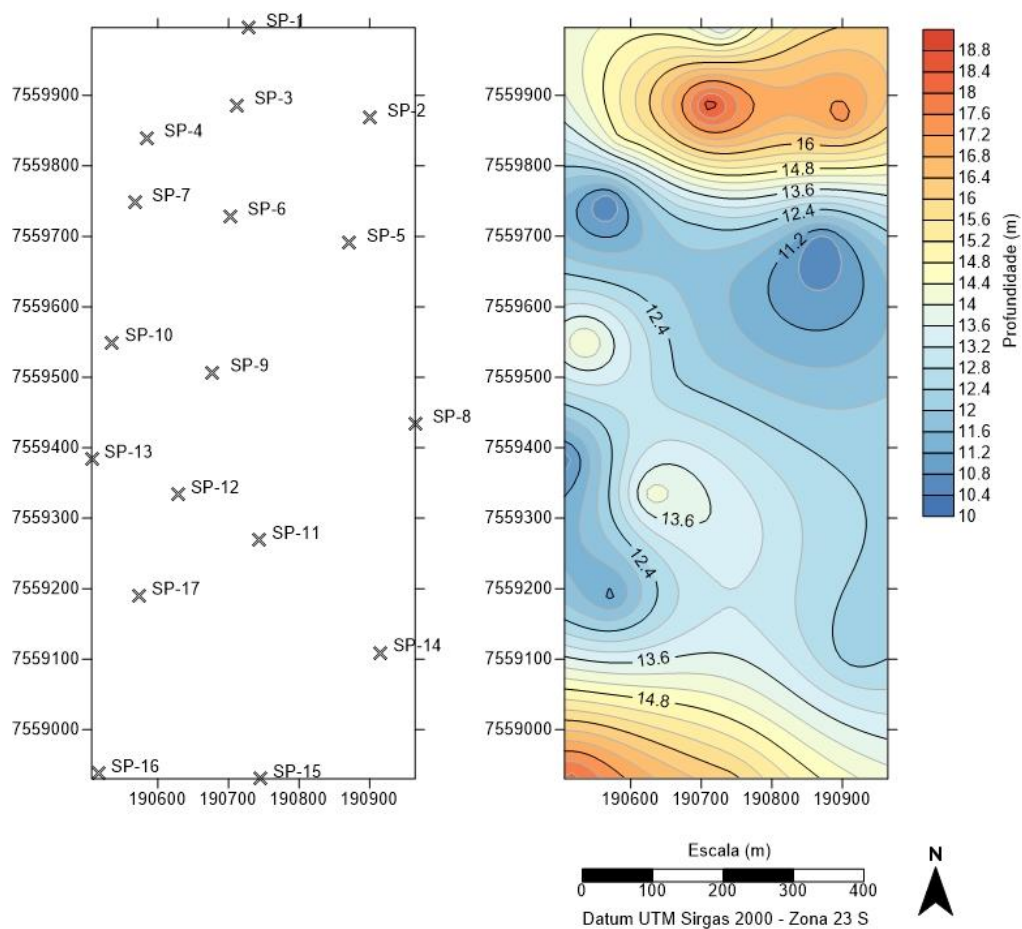
Apesar de mais onerosas, a realização de perfurações por sondagens é importante para que sejam fornecidos dados exatos sobre o subsolo. Entretanto, para diminuir os custos, é mais interessante, por vezes, que estas sondagens sejam realizadas após os levantamentos geofísicos (BRAGA, 2016). Além dos custos mais elevados, certamente dispendidos neste aterro, os perfis geoelétricos poderiam ter auxiliado na escolha dos melhores locais para realização das sondagens mecânicas. Ainda, se os ensaios elétricos tivessem sido realizados na mesma época das sondagens SPT, as zonas de umidade, identificadas nas seções de resistividade, poderiam ter sido mais bem estudadas.

### 6.1.2. Mapa de profundidade do impenetrável

A partir dos dados das sondagens SPT, apresentados na Tabela 2, e com auxílio do software *Surfer*, foi possível elaborar o mapa de profundidade da Figura 32-(b), com isolinhas equidistantes 0,4 metros. O mapa compreende a área destinada aos resíduos e adjacências. A localização das sondagens pode ser observada na Figura 32-(a), nominadas “SP”-1.

As menores profundidades do impenetrável, entre 10 e 13,6 metros, estão representadas pelas cores azuladas na Figura 32-(b); e podem ser observadas na região mais central da área, com os menores valores localizados entre as coordenadas 7559800 mN e 7559600 mN - porção centro-norte. Já as maiores profundidades, superiores a 14 metros, são representadas pelas cores avermelhadas e concentram-se nas extremidades norte (próximas às linhas A e B) e sul da região onde foram realizadas as sondagens. As profundidades variam até 8 metros, entre os maiores e menores isovalores do terreno de dimensões 1100 x 500 metros.

Figura 32 - Localização das sondagens SPT, à esquerda (a), e mapa do impenetrável, à direita (b)



Fonte: Autor (elaborado a partir do software *Surfer*).

### 6.1.3. Mapa do topo rochoso a partir dos caminhamentos elétricos

Para elaborar o mapa de topo rochoso a partir dos caminhamentos elétricos foi identificado nos perfis de resistividades elaborados no RES2DINV as profundidades do topo da rocha. Na Tabela 3 são apresentadas as coordenadas UTM de cada ponto selecionado nas seções, seguindo a nomenclatura “P”-1, e suas respectivas profundidades. Para a linha G, não foram obtidas as coordenadas UTM do caminhamento elétrico.

Tabela 3 - Coordenadas UTM das localizações dos topos do diabásio segundo as linhas de caminhamento elétrico e resultados das profundidades identificadas do topo da rocha

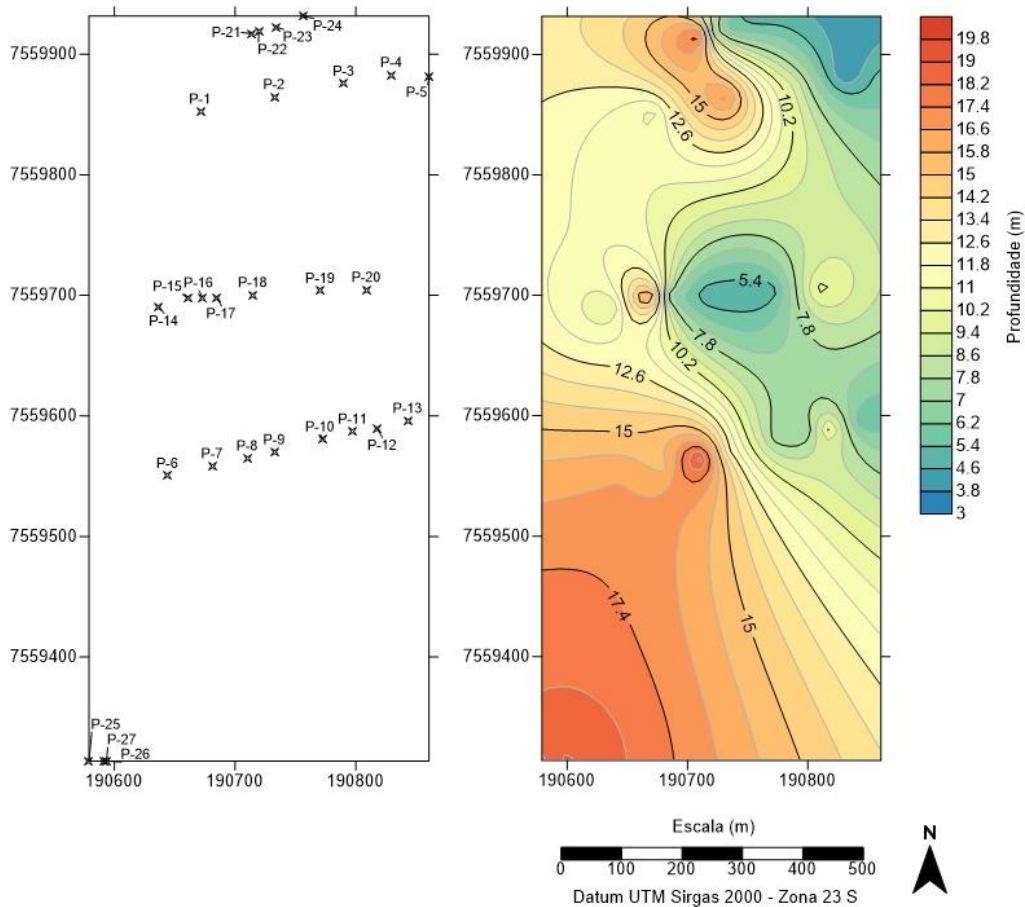
Nomenclatura	Coordenada X	Coordenada Y	Profundidade do topo rochoso (m)
P-1	190671,27	7559852,59	10,80
P-2	190732,59	7559864,73	17,00
P-3	190790,31	7559875,82	9,00
P-4	190829,92	7559882,85	3,80
P-5	190860,72	7559881,29	5,80
P-6	190644,18	7559550,53	16,50
P-7	190681,26	7559558,43	15,50
P-8	190710,35	7559564,89	19,50
P-9	190732,80	7559570,09	13,00
P-10	190772,68	7559580,82	7,50
P-11	190797,73	7559587,30	7,00
P-12	190817,61	7559589,80	10,50
P-13	190843,27	7559596,07	5,50
P-14	190636,68	7559690,77	10,00
P-15	190660,70	7559697,85	15,50
P-16	190673,26	7559698,33	15,50
P-17	190684,88	7559698,28	7,00
P-18	190714,94	7559700,37	5,00
P-19	190770,85	7559704,07	5,00
P-20	190809,02	7559704,79	10,50
P-21	190713,50	7559917,20	17,90
P-22	190719,69	7559918,47	9,40
P-23	190734,00	7559922,51	5,70
P-24	190756,27	7559931,62	5,00
P-25	190578,92	7559313,76	18,10
P-26	190591,74	7559313,92	18,50
P-27	190593,45	7559314,03	19,20

Foi elaborado um mapa de topo rochoso (Figura 33 - (b)) a partir dos dados geoeletricos, com isolinhas equidistantes 0,8 metros. Na Figura 33 - (a) estão representadas as coordenadas dos

pontos onde foram identificados os topos do diabásio. As dimensões do mapa alcançam uma área menor que a apresentada no mapa anterior, pois os ensaios geofísicos concentraram-se apenas na região destinada à cava de resíduos e as profundidades referentes à linha G não puderam ser utilizadas. Extrapolar as dimensões do mapa para regiões distantes dos dados obtidos também pode acarretar maiores erros nas interpolações.

Analisando o mapa da Figura 33, o topo do diabásio apresenta-se com grandes variações de profundidades, entre 3 e 20 metros, numa área de dimensões 600 x 300 metros. As maiores profundidades estão localizadas nas regiões de cores avermelhadas, principalmente nas porções centro-oeste, com valores maiores que 10,2 metros. Observa-se também a rocha muito próxima à superfície, com profundidades menores que 5,4 metros, na região central, entre as coordenadas 7559700 mN e 190700 mE a 190800 mE, e na poção superior, a nordeste.

Figura 33 - Localização dos pontos identificados a partir das linhas de resistividade, à esquerda (a), e mapa de topo da rocha diabásio, à direita (b)



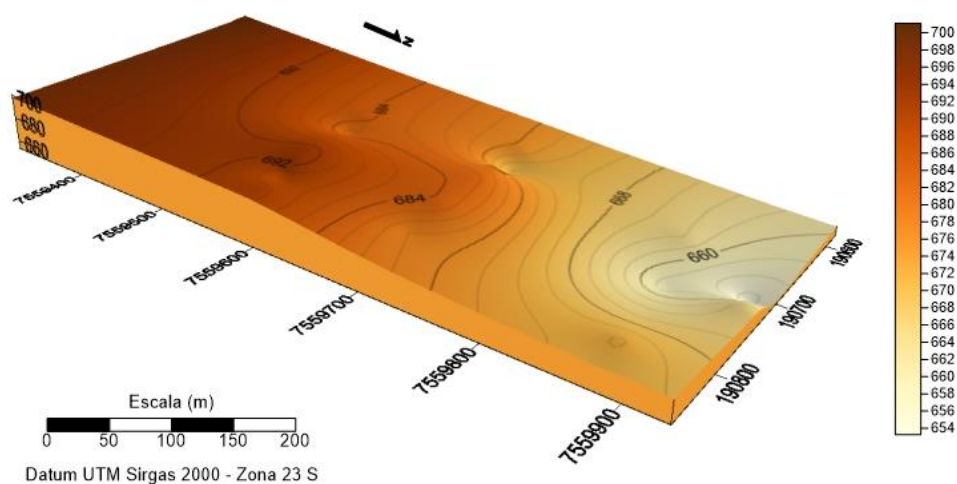
Fonte: Autor (elaborado a partir do software *Surfer*).



### 6.1.3.1. Mapa de elevação do topo rochoso

Foi elaborado mapa de elevação do topo rochoso em perspectiva (Figura 34), com isolinhas equidistantes 0,5 metros e eixo Z com exagero vertical. Pelo modelo da figura, observa-se uma declividade da superfície do topo rochoso, com mergulho na direção nordeste e diferença topográfica de aproximadamente 50 metros entre os maiores e menores isovalores. A partir deste modelo, é possível inferir que o fluxo de água que infiltra no solo, principalmente nas regiões de menor profundidade do diabásio, seguirá a mesma direção do declive (direção nordeste), uma vez que rochas ígneas, como os diabásios, são muito pouco permeáveis (SOARES et al., 2008).

Figura 34 - Modelo de elevação do topo rochoso



Fonte: Autor (elaborado a partir do software *Surfer*).

### 6.1.4. Mapa do topo rochoso a partir das sondagens SPT e geelétricas

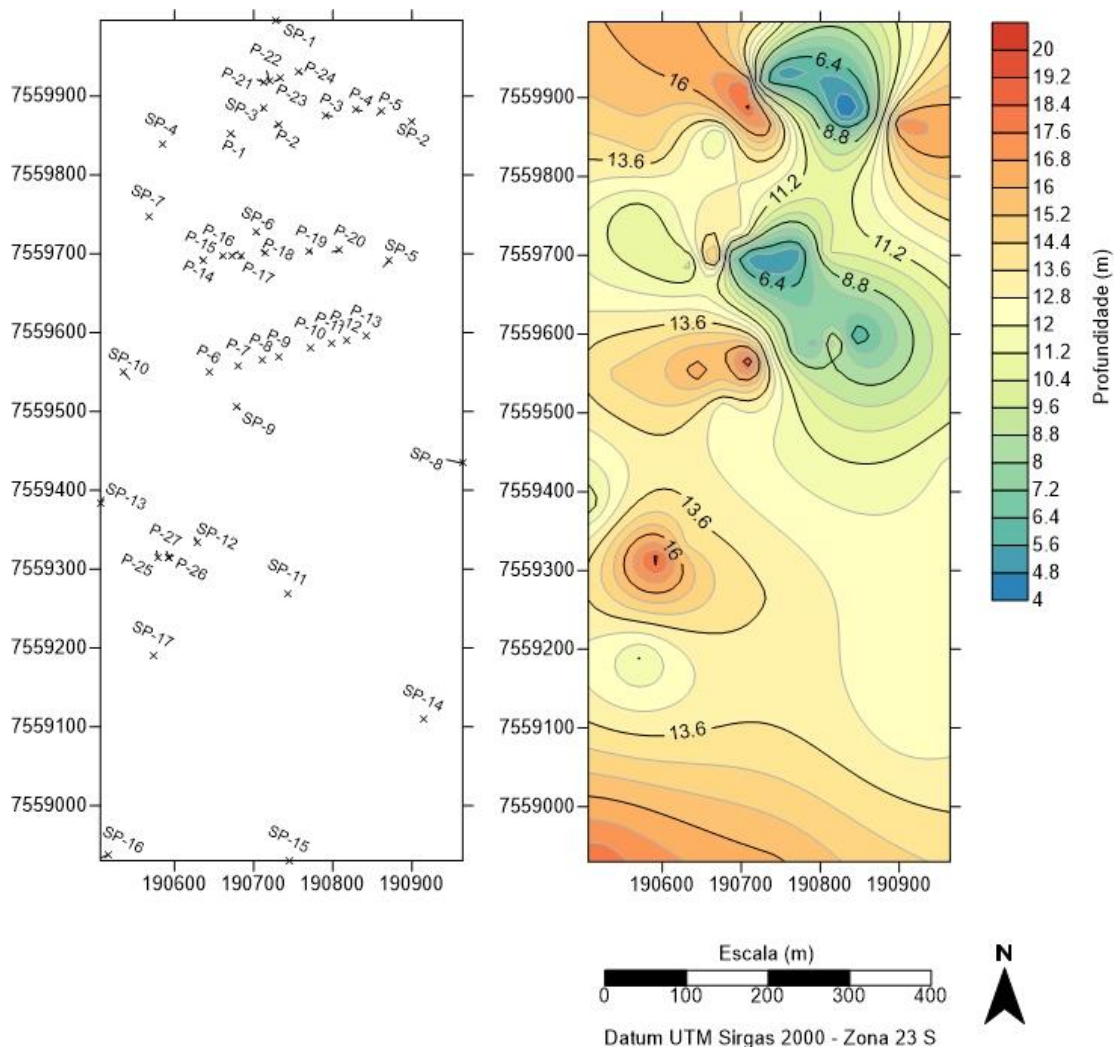
Comparando os dois mapas anteriores, é possível notar que as profundidades encontradas a partir do método geelétrico apresentam, por vezes, valores mais próximos à superfície em regiões onde apenas as sondagens SPT não foram capazes de mapear. Isto se deve ao fato destes métodos diretos realizarem investigações pontuais nas áreas de estudo, apenas em profundidade, enquanto o método geelétrico estudado possibilita também uma investigação horizontal.

Em determinados casos de engenharia, apenas o uso das sondagens SPT pode ser suficiente para o objetivo pretendido. Porém, quando se investigam regiões com topografias irregulares e

profundidades de topo rochoso com grandes variações, os resultados se mostram discrepantes da realidade. Isto pôde ser constatado no aterro estudado, onde o mapa do impenetrável apresentava profundidades maiores para a rocha na região próxima à cava de chorume, mas ao serem realizadas as primeiras escavações, a rocha já se encontrava próxima à superfície.

Percebe-se a importância da união dos dados obtidos por ambos os métodos utilizados neste aterro para construção de um mapa mais condizente com a realidade. Assim, o mapa do topo rochoso da Figura 35 foi elaborado, também com auxílio do software *Surfer*.

Figura 35 - Localização dos pontos identificados a partir das linhas de resistividade e sondagens SPT, à esquerda (a), e mapa de topo da rocha diabásio, à direita (b)



Fonte: Autor (elaborado a partir do software *Surfer*).

As menores profundidades do diabásio na região concentram-se a nordeste do mapa, com valores inferiores a 11,2 metros. Entretanto, nas porções norte e centro-norte da área também

observam-se as maiores variações de profundidades obtidas. A região sul do mapa não possui tantos pontos interpolados devido à ausência de dados, como é mostrado na Figura 35-(a). Na mesma região onde foi realizado o caminhamento elétrico da linha F, entre as coordenadas 7559300 mN e 190600 mE, também foi realizado o ensaio SP-12 – distante 37 metros do P-26. Entre ambos os pontos, as profundidades obtidas distam 4,3 metros. Ou seja, não há grandes variações nesta região. Isto pode indicar que a sondagem SPT alcançou a profundidade do topo rochoso.

Verificam-se grandes diferenças entre os mapas das Figura 32 e Figura 35. A maior diferença pode ser observada na escala das profundidades. Os ensaios SPT não foram capazes de prever profundidades menores que 10 metros, enquanto os ensaios geoeletricos foram capazes de apontar para profundidades de até 4 metros. Além disso, o relevo da região é consideravelmente mais irregular que o obtido segundo as sondagens SPT, principalmente na região central.

#### *6.1.5. Conclusões sobre os mapas elaborados*

Ao serem comparados os mapas elaborados, principalmente da Figura 32 e o último (Figura 35), foi evidente a importância de serem empregados métodos geofísicos nas investigações de engenharia. Os resultados obtidos pelos ensaios diretos se mostraram ineficientes para mapear uma região de relevo topográfico irregular, pois as profundidades segundo dados de resistividade, em determinadas regiões, eram menores que aquelas interpoladas a partir os dados SPT. Isto foi comprovado na escavação de uma das cavas, como exposto anteriormente.

Quando a área não é adequadamente mapeada, alguns imprevistos podem ocorrer em campo, elevando os custos de implantação do aterro. É importante que seja delimitada corretamente a região que serão dispostos os resíduos, com as devidas profundidades projetadas para cava, pois durante a elaboração do projeto, para posterior execução, devem ser definidas as redes de drenagem superficial e subterrânea, execução da impermeabilização, os sistemas de poços de monitoramento, além da vida útil do aterro – que se relaciona com uma maior capacidade ou volume de resíduos que o aterro pode receber.

O mapeamento geofísico, através a elaboração do mapa de elevação, também permitiu identificar a provável direção do fluxo de águas que percolam em subsuperfície. Esta informação pode ser útil para selecionar as localizações dos poços de monitoramento, uma vez que possíveis contaminantes também seguiriam esta mesma direção de fluxo.

## 6.2. Lixão desativado de São Carlos

Para cada linha de caminhamento elétrico foram gerados, a partir do software RES2DINV, 12 seções de perfis invertidos de resistividade e de cargabilidade.

Uma vez que a região já foi extensamente utilizada para disposição dos resíduos urbanos da cidade de São Carlos, este estudo teve por finalidade explorar os métodos geoeletricos como ferramenta de investigação de possíveis contaminantes oriundos destes resíduos. Ou seja, buscou-se identificar nas seções de caminhamento elétrico as regiões que apresentam anomalias resistivas e de cargabilidade e que apontem para possíveis plumas de contaminação. Para estas investigações, as informações de poços de monitoramento a respeito do tipo de solo ou material presentes em profundidade foram importantes para ratificar os resultados encontrados pelos métodos indiretos.

Como apresentado anteriormente, a área de estudo compreende arenitos permeáveis com poucos finos, solo predominantemente arenoso e profundidade da zona saturada variando em cada seção, de 1,97 metros a 8,7 metros. Este tipo de solo, quando em zona saturada, apresenta maior resistividade dentre os demais, com valores normalmente superiores a 60 ohm.m (Tabela 1), mas a presença de contaminantes altera a resistividade e reduz estes valores. De maneira similar, uma maior concentração de choro, num meio poroso, saturado com alta salinidade, pode reduzir valores de cargabilidade. Porém, cada seção de caminhamento elétrico foi analisada de maneira individual e as seções de cargabilidade desempenharam o papel de método auxiliar.

### Linha 0

A primeira linha de caminhamento elétrico foi executada fora da área da cava de resíduos, onde passa um pequeno córrego entre as posições 20m e 30m na horizontal, aproximadamente. Na região deste córrego, pela Figura 36, são encontrados os menores valores de resistividade da seção (menores que 156 ohm.m), que se estendem horizontalmente até aproximadamente 60 metros e seguem na direção vertical, até a elevação de 763 metros. Velozo (2006) realizou coleta e análise das águas deste córrego, à montante (próximo à linha 0) e à jusante do corpo de resíduos, cujos resultados demonstraram baixos valores de resistividade, 84,03 ohm.m e 70,4 ohm.m respectivamente, caracterizando contaminação das águas. Estes resultados corroboram com os valores de resistividades encontrados na seção de resistividade e indicam provável

contaminação do córrego. Entre as posições 60 e 70 metros na horizontal, o fluido contaminante aparenta seguir um fluxo vertical preferencial. Esta provável contaminação pode ser oriunda do corpo de resíduos, uma vez que o percolado segue o fluxo preferencial SE-NW (VELOZO, 2006), e de substâncias que adentram o córrego. Na mesma posição, o perfil de cargabilidade da Figura 37 é marcado por valores menores que 8,7 mV/V, indicando também possível caminho preferencial do fluxo de percolados.

Altos valores de resistividade são observados em duas regiões. Na porção central superficial, principalmente a partir dos 50 metros na horizontal, altos valores de resistividade certamente correspondem a solo seco, com resposta IP inconclusiva para esta região – comportamento observado nas seções do aterro sanitário em que o solo não estava saturado. Outra região da seção apresenta altos valores de resistividade: entre 20 metros e 40 metros na horizontal, a partir da elevação 768 metros. O trabalho de Álvares (2000) já apontava para a presença de arenito silicificado, que são rochas silicosas e sedimentares clásticas, compostas basicamente de grãos de quartzo e minerais acessórios (ARAÚJO, 1992), ou presença de sill de diabásio na região do lixão. A existência destas rochas presentes no subsolo pode justificar o aumento nos valores de resistividade e, conseqüentemente, de cargabilidade.

Figura 36 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 0, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

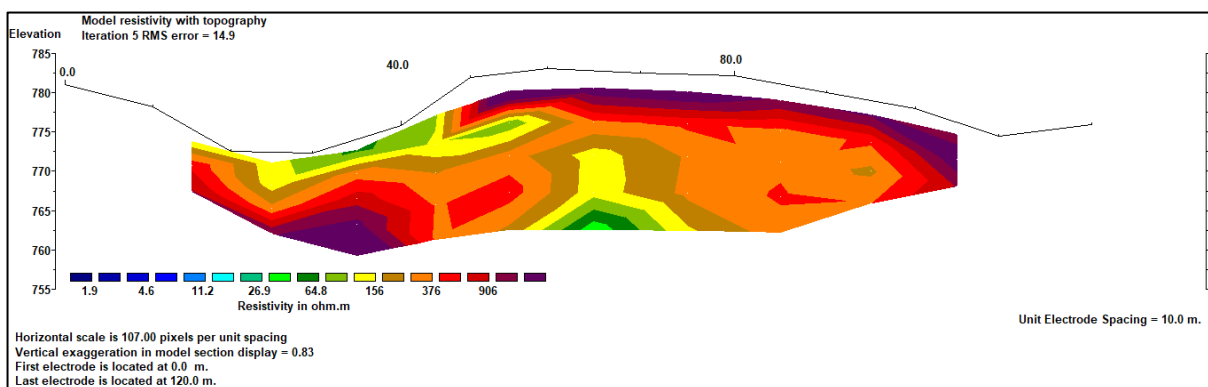
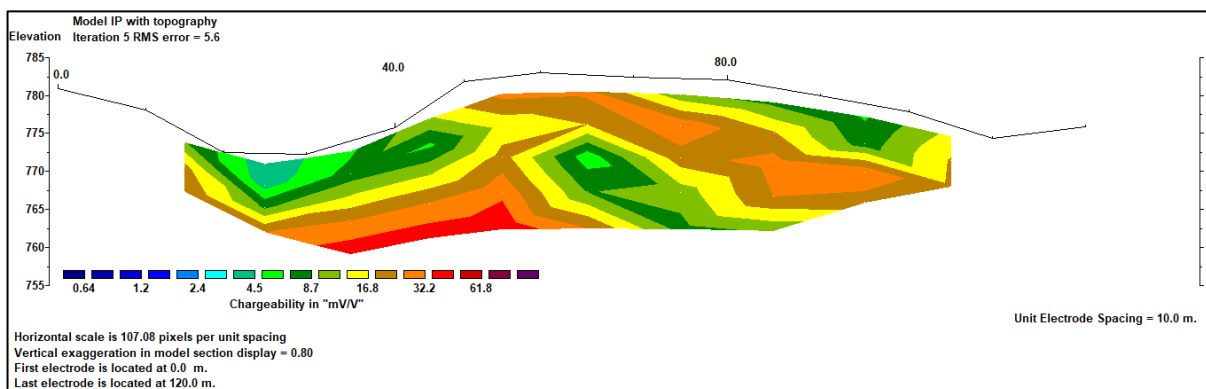


Figura 37 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 0, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



## Linha 1

Esta linha de caminhamento elétrico localiza-se no limite do início da cava de resíduos, a NW. A seção de resistividade da Figura 38 é marcada por baixos valores de resistividade, menores que 26,9 ohm.m, na porção central do perfil, entre aproximadamente 50 e 90 metros na horizontal. Os baixos valores de resistividade se estendem lateralmente e em profundidade, alcançando elevações de até 767 metros próximo aos 80 metros na horizontal. Estes resultados indicam presença de contaminantes que percolam o solo arenoso. Estes contaminantes estão presentes também nos dados do poço de monitoramento P-28, ao longo dos 10 metros de profundidade da areia fina. As informações deste poço também indicam a presença de resíduos no segundo metro de profundidade.

Já no perfil de cargabilidade da Figura 39, observam-se valores de cargabilidade abaixo de 8,7 mV/V, entre as posições 50 e 60 metros, aproximadamente. Esta anomalia sugere um possível caminho preferencial do fluxo de percolados, certificado por informações do poço de monitoramento neste local, que indica presença de areia fina siltosa negra por influência de chorume. O perfil também é marcado por altos valores de cargabilidade, acima de 40 ohm.m, entre 40 e 100 metros na horizontal, alcançando elevação superior a 765 metros. Sabe-se que material polarizável (resíduos) é presente nos primeiros metros na cava, o que justifica maior resposta IP nesta região. Entretanto, os valores de cargabilidade aumentam na profundidade abaixo dos resíduos. Uma menor concentração de chorume pode aumentar os valores do parâmetro.

Na região onde está localizado o poço P-27, sabe-se que não há contaminação por choro. O aumento nos valores de resistividade também reforçam esta ausência de lixiviados.

Figura 38 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 1, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

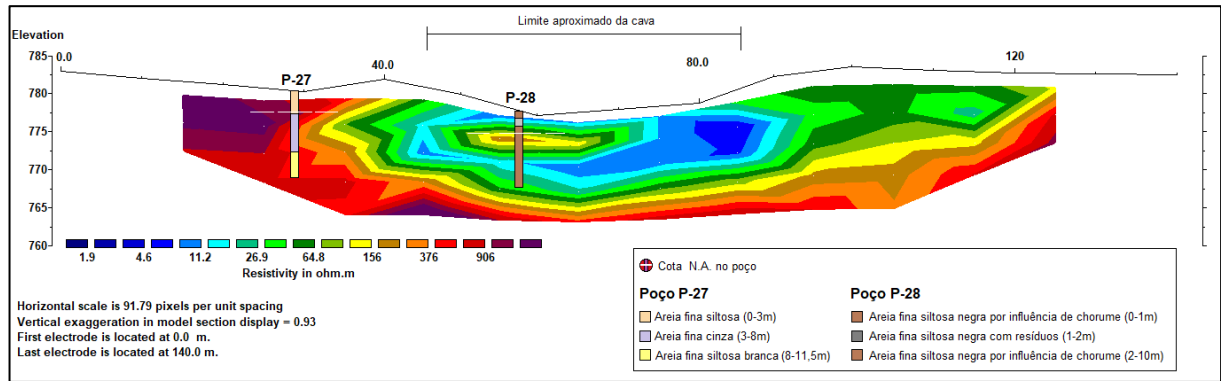
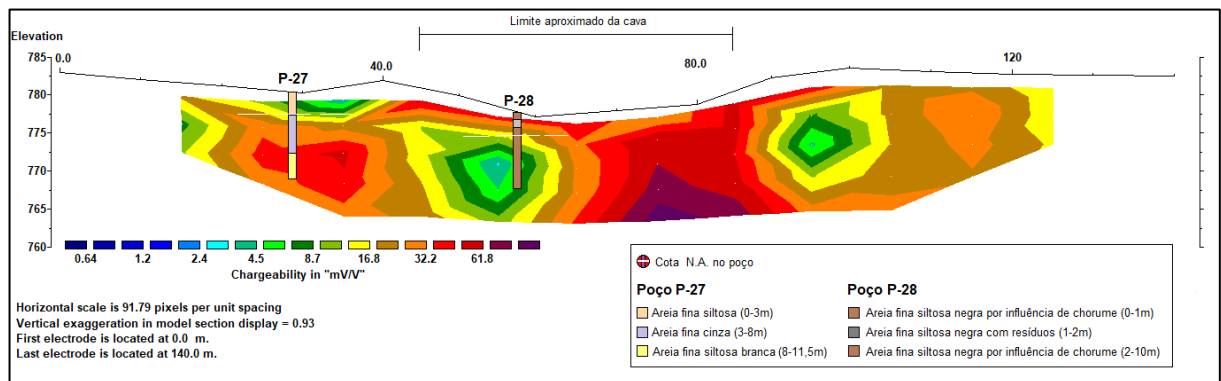


Figura 39 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 1, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



## Linha 2

A terceira linha de caminhamento elétrico foi realizada cruzando toda a seção transversal da vala, passando próxima a dois poços de monitoramento, o P-26 e o P-30. Neste perfil observam-se baixos valores de resistividade ( $< 11,2$  ohm.m) concentrados entre 75 metros e 120 metros, principalmente, e valores de resistividade  $< 156$  ohm.m que se espalham lateralmente (Figura 40). Pelas coordenadas obtidas em campo, o limite aproximado da cava de resíduos está entre 55 e 140 metros na horizontal, mesma região em que se observam baixos valores de resistividade, menores que 156 ohm.m. Estes resultados indicam presença de resíduos e percolado. Os resíduos se concentram nos primeiros 7 metros, segundo dados do poço de monitoramento P-30, com a pluma de contaminação alcançando, ao menos, os primeiros 10

metros em profundidade. Pela seção de resistividade, a pluma de contaminação se estende até a elevação de 762 metros.

O perfil de cargabilidade da Figura 41 traz interpretações interessantes. Observa-se, inicialmente, maiores valores de cargabilidade no limite aproximado da cava de resíduos, que também se estendem até, aproximadamente, os 7 primeiros metros na posição em que se encontra o poço P-30. Altos valores de cargabilidade, nestas condições, certamente estão ligados à presença de materiais polarizáveis e chorume. A composição do poço P-30 traz também a existência de fragmentos de arenito silicificado entre as profundidades 10 e 14 metros. Esta composição pode explicar os altos valores de cargabilidade nesta região do poço, abaixo da cava de resíduos. Outra hipótese para explicar este aumento da resposta IP seria a diminuição na concentração de chorume com o aumento da profundidade. Por fim, observam-se valores de cargabilidade abaixo de 5,6 mV/V, entre as posições 70 metros e 90 metros aproximadamente. Novamente, uma hipótese seria a existência de um caminho preferencial do fluxo de percolados; entretanto, não há informações de poços que a confirme.

Figura 40 – Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 2, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

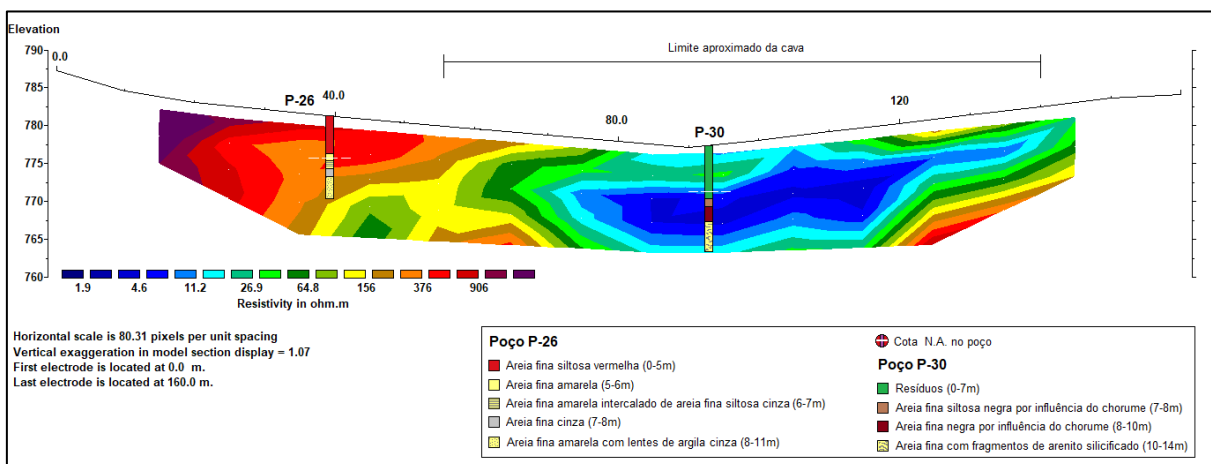
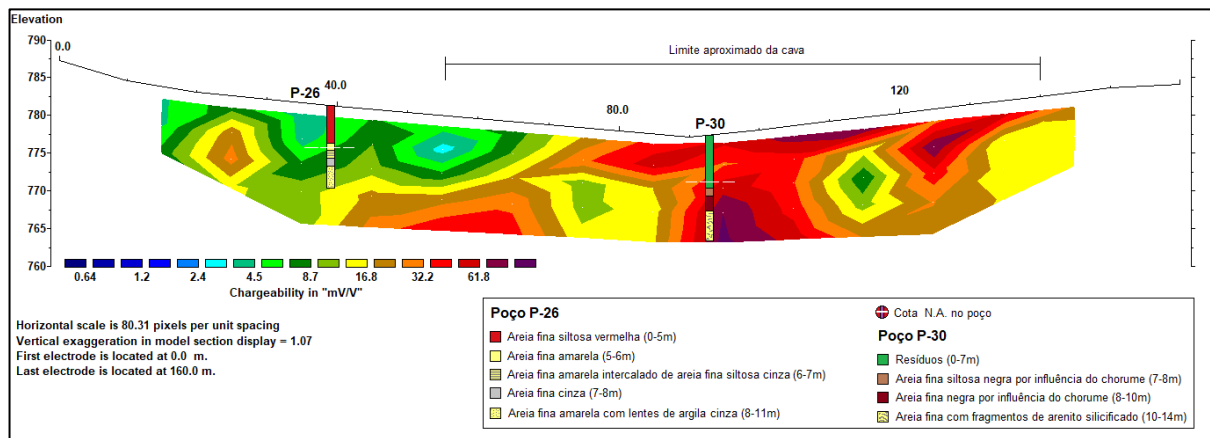




Figura 41 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 2, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



### Linha 3

Na seção de resistividade da Figura 42 são encontrados valores de resistividade menores que 26,9 ohm.m, entre as posições 30 metros e 110 metros, alcançando profundidades inferiores à elevação de 778 metros. Esta região corresponde à cava de resíduos, cujo limite se encontra entre 50 e 145 metros, aproximadamente. A partir destas informações, é possível afirmar que os valores de baixa resistividade correspondem aos resíduos e percolado, que se estendem até profundidade próximas a 6,5 metros, segundo composição do poço de monitoramento P-31. A região de baixa resistividade, abaixo do limite inferior da cava, indica a presença de contaminantes, até profundidades que alcançam o limite da seção. Ainda de acordo com informações do poço P-31, material contaminado com churume está presente a partir dos 6,5 metros, até sua profundidade final. O poço P-25, localizado na parte externa à cava de resíduos, não apresenta percolado nas camadas de areias identificadas.

Já na seção de cargabilidade da Figura 43 é possível compreender os altos valores de cargabilidade na região da cava segundo a presença de material polarizável e churume oriundos dos resíduos. A concentração de churume na região da cava, aliada à porosidade, vai influenciar a resposta IP. Nesta situação também é possível que os altos valores de cargabilidade, na região identificada por baixos valores de resistividade, abaixo do limite da cava, indiquem a presença de percolado.

Figura 42 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 3, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

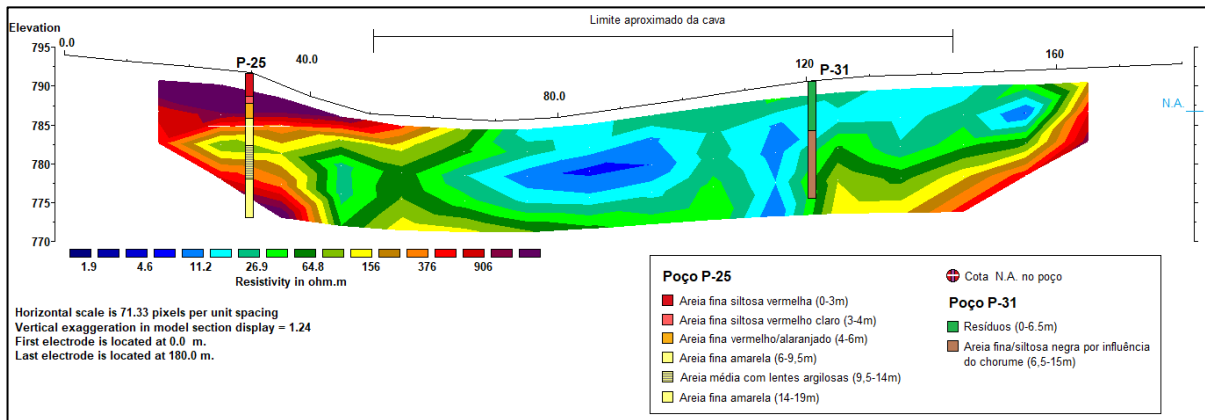
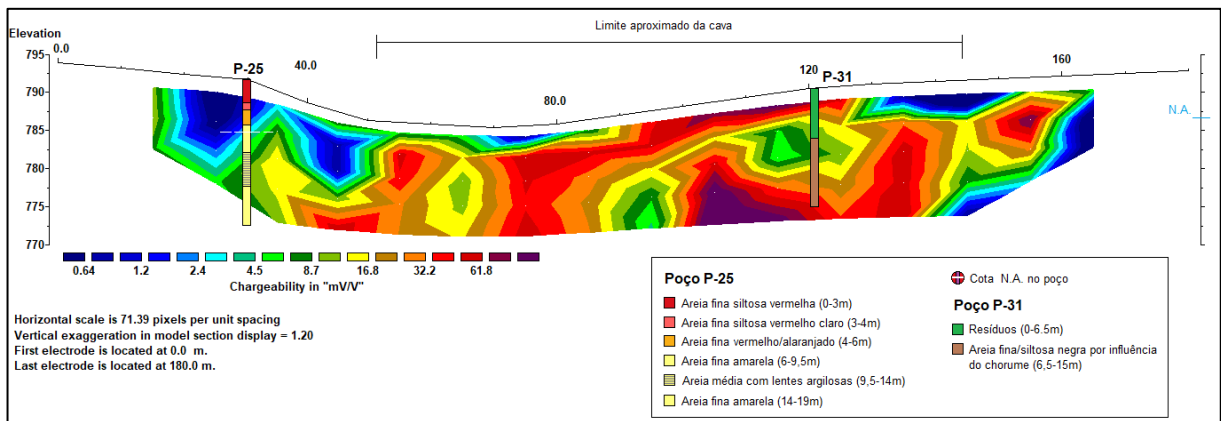


Figura 43 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 3, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



## Linha 4

A seção de caminhamento elétrico da Figura 44, para resistividade, é caracterizada por baixos valores de resistividade, menores que 26,9 ohm.m, entre as posições 70 e 170 metros. O limite da cava de resíduos está localizado entre 60 e 180 metros na horizontal, mas sua profundidade não é conhecida, uma vez que não há poços de monitoramento na região da cava. Entretanto, pela seção de cargabilidade da Figura 45, é possível delimitar a cava de resíduos a uma profundidade superior a 5 metros, marcado por valores de cargabilidade maiores que 16 mV/V.

Abaixo da cava de resíduos estende-se a anomalia de baixa resistividade, até elevações próximas a 778 metros, sugerindo a presença de percolados junto à areia fina característica da região. Novamente, os altos valores de cargabilidade nesta área podem estar relacionados a uma menor concentração de lixiviado.

Figura 44 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 4, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

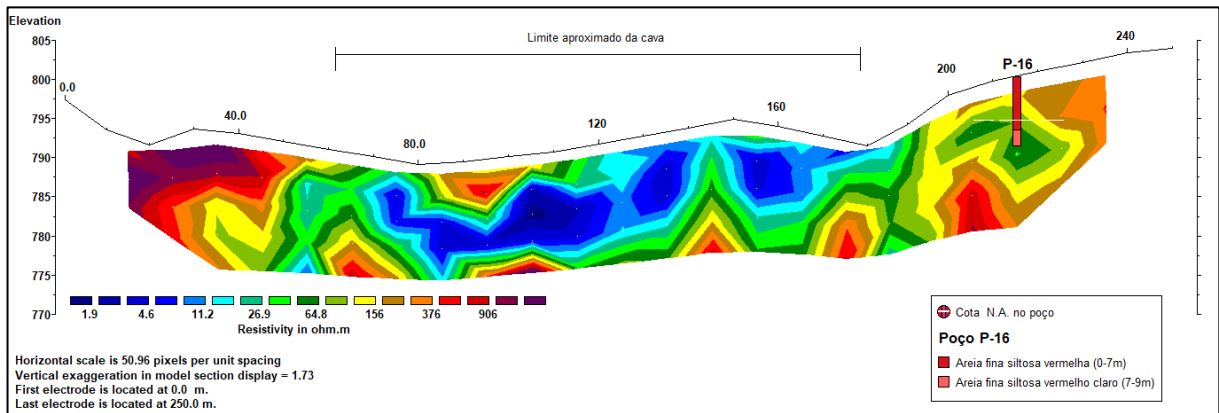
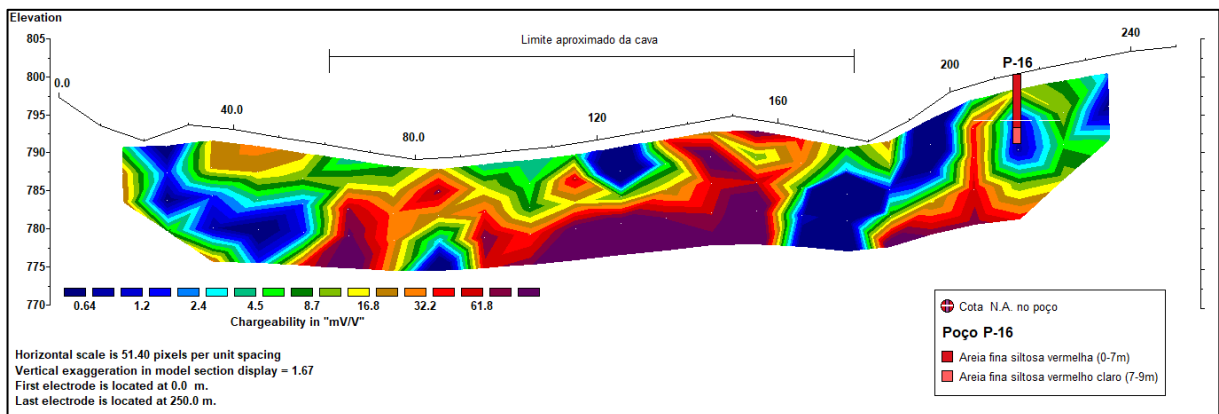


Figura 45 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 4, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



## Linha 5

A seção de caminhamento elétrico da Figura 46, é marcada por valores de resistividade menores que 64,8 ohm.m, entre 30 e 120 metros na horizontal, alcançando profundidade de até 15 metros próximo à posição de 90 metros. O limite aproximado da cava de resíduos situa-se nesta região, entre 40 metros e 130 metros. Compreende-se que estes valores de resistividade se devem à região contaminada por chorume, que se estende lateralmente ao limite da cava. O poço de monitoramento P-33, localizado próximo à posição de 90 metros, confirma a presença de resíduos até 8,7 metros e chorume até o limite da elevação do perfil. Já o poço P-24, localizado na região de maior resistividade e fora do limite da cava, não apresenta contaminação.

No perfil da Figura 47 observam-se valores para cargabilidade superiores a 8,7 mV/V na mesma região em que se delimitou a cava de resíduos. Como já mencionado nas seções precedentes,

maiores valores de cargabilidade podem estar associados à presença de materiais polarizáveis presentes nos resíduos, assim como a presença de contaminantes.

Figura 46 - Seção de Caminhamento Elétrico para resistividade, linha 5, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros

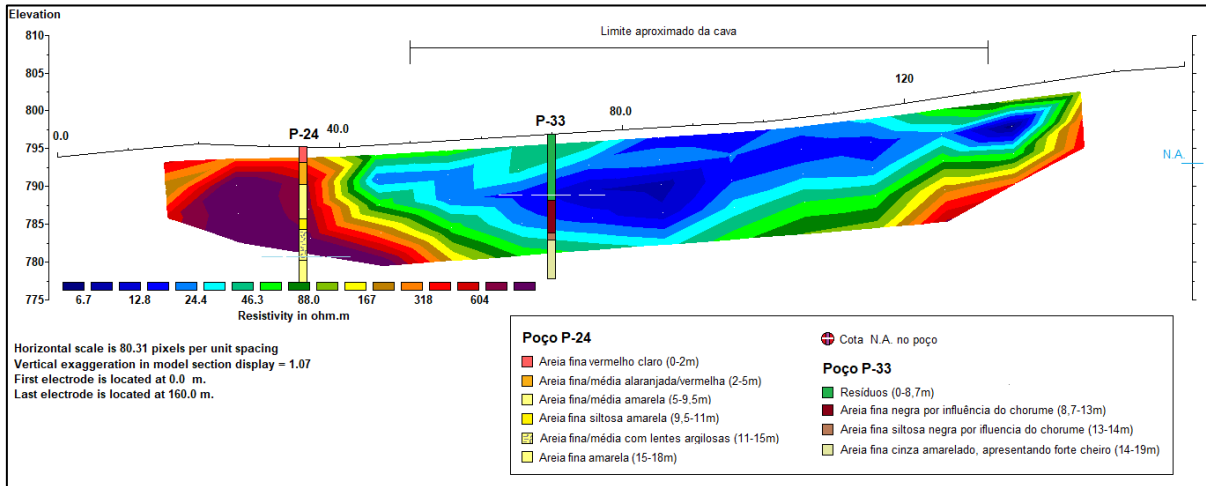
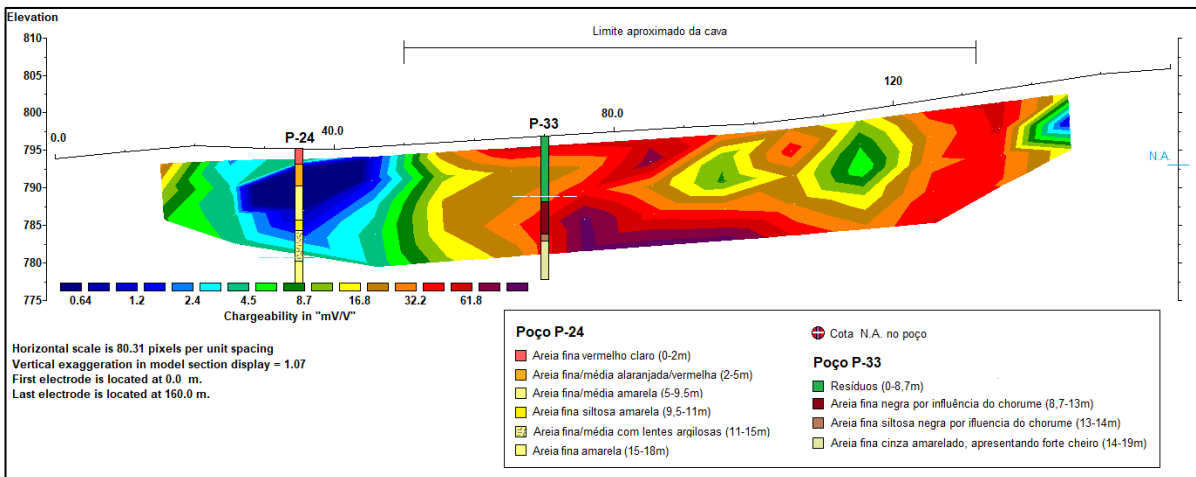


Figura 47 - Seção de Caminhamento Elétrico para cargabilidade, linha 5, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros



### 6.2.1. Considerações sobre as interpretações das seções do Lixão

O estudo de dados de resistividade e polarização induzida do lixão, que teve por objetivo identificar possíveis contaminações por percolado, mostrou-se eficiente. Todas as seções de resistividade apresentaram o mesmo comportamento na região da cava de resíduos: baixos valores de resistividades, geralmente menores que 27 ohm.m. Estes resultados apontaram a existência de pluma de contaminação. Observou-se também que em determinadas seções estes valores alcançavam limites superiores à cava, fato que pode ser justificado pela própria natureza

do solo presente na região – altamente permeável. Brahmi et al. (2021) compreende que as plumas de lixiviado, resultantes de resíduos dos aterros, são altamente ricas em íons e materiais metálicos. Por consequência, ainda segundo o autor, são obtidos valores muito baixos de resistividade, e, frequentemente, altos valores de cargabilidade.

Apesar dos valores resultantes da polarização induzida não serem facilmente interpretáveis, em todos os perfis foram encontrados altos valores de cargabilidade na região da cava, principalmente, e na região do percolado. Ou seja, a presença de materiais polarizáveis e chorume aumentou a resposta IP nas seções analisadas.

Com relação ao solo contaminado por percolados, é importante destacar que o comportamento não segue sempre o mesmo padrão. Baixos valores de cargabilidade estão normalmente relacionados à alta concentração de sais. Entretanto, uma queda na salinidade do fluido pode produzir alto efeito IP (USTRA, 2008). Gallas et al. (2011) também verifica que, quando preenchidos os poros do solo – maior concentração do conteúdo iônico, o lixiviado produz baixa cargabilidade.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, com auxílio dos softwares de inversão e mapeamento, respectivamente RES2DINV e *Surfer*, atestaram o potencial dos métodos geoeletricos, especialmente eletrorresistividade e polarização induzida, na investigação de área para instalação de aterro sanitário, delimitando o topo da rocha, e no monitoramento de contaminantes em região já utilizada para descarte de resíduos sólidos, identificando pluma de contaminação e delimitando a cava de resíduos.

Os modelos de resistividade e cargabilidade de ambas as áreas estudadas apresentaram características distintas, resultado das propriedades do subsolo e natureza dos empreendimentos. O aterro sanitário foi utilizado para o estudo geoeletrico no início do empreendimento, ou seja, não haviam sido realizadas escavações nem disposição de resíduos no local. Além disso, o solo da região é argiloso e o nível do lençol freático encontrava-se em profundidades superiores às alcançadas pelos ensaios SPT. Já a investigação geoeletrica no lixão desativado foi realizada quase 10 anos após seu encerramento. O solo da região é predominantemente arenoso e o nível d'água encontra-se em baixas profundidades.

As seções de caminhamento elétrico para resistividade apresentaram valores médios entre 18 e 1118 ohm.m. Valores menores que 107 ohm.m foram interpretados como zonas de umidade no solo, certamente provenientes de precipitações, enquanto resistividades superiores a 107 ohm.m e inferiores a 346 ohm.m sugerem presença de solo não saturado. A delimitação do topo do diabásio foi realizada para valores superiores a 346 ohm.m. Os dados de cargabilidade foram utilizados como método auxiliar, atestando a presença de rocha quando o aumento da cargabilidade se relaciona ao aumento da resistividade com a profundidade. O perfil de cargabilidade tem importância verificada nas seções de caminhamento elétrico da linha A, cuja resposta IP descaracterizou a existência de diabásio entre as posições 30 metros e 60 metros na horizontal.

A elaboração dos mapas do impenetrável e de topo rochoso evidenciaram a importância da utilização de métodos geofísicos para complementar sondagens mecânicas. Quando considerados apenas os dados da sondagem SPT, observam-se valores elevados de profundidade do impenetrável, fornecendo falsa informação de que as cavas podem ser escavadas até maiores profundidades. Entretanto, comparando-os com os dados geofísicos, observam-se regiões com topo do diabásio em profundidades muito próximas à superfície.

Erros em campo, como foi constatado na escavação da primeira cava pela equipe responsável, próxima à linha A, podem acarretar custos não previstos e incertezas. A elaboração do mapa de elevação, a partir dos dados geofísicos, também foi importante para apontar a direção nordeste como preferencial do fluxo de água que infiltra no subsolo. Desta forma a geofísica pode auxiliar na escolha das localizações dos poços de monitoramento e, posteriormente, na investigação de plumas de contaminação.

Os modelos gerados para o antigo lixão apresentaram resistividades menores que a área de estudo anterior, com valores médios entre 1,9 ohm.m e 906 ohm.m. Anomalias condutoras com valores de resistividade menores que 27 ohm.m sugeriram presença de resíduos e contaminantes. O percolado foi identificado até profundidades limites da seção, em algumas regiões, justificado pela ausência de sistemas de impermeabilização e de drenagem no lixão, aliado à permeabilidade elevada de solos arenosos. Os perfis de cargabilidade apresentaram comportamento semelhante em todas as seções analisadas: altos valores de cargabilidade na região da cava - característicos de materiais polarizáveis presentes nos resíduos, e altos valores na região inferior à cava – normalmente relacionados à menor concentração de sais na região dos percolados. Também foram identificados pontos de menor cargabilidade em algumas seções, interpretados como possíveis regiões preferenciais de fluxo de percolados.

## 8. REFERÊNCIAS

AARHUS GEOSOFTWARE. **Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method.** 2022.

ABIOLA, A.-H. O. et al. Comparison of respiratory and skin disorders between residents living close to and far from Solous landfill site in Lagos State, Nigeria. **African Journal of Primary Health Care & Family Medicine**, v. 13, n. 1, p. 7, 30 abr. 2021.

ABIRIGA, D.; VESTGARDEN, L. S.; KLEMPE, H. Groundwater contamination from a municipal landfill: Effect of age, landfill closure, and season on groundwater chemistry. **Science of The Total Environment**, v. 737, p. 140307, 1 out. 2020.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. 1992.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. 1997.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6.484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. 2001.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação. 2004.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2021.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2022.

ALLRED, B.; DANIELS, J. J.; EHSANI, M. R. (EDS.). **Handbook of Agricultural Geophysics.** 1ª edição ed. [s.l.] CRC Press, 2008.

ÁLVARES, C. M. B. **Contribuição ao conhecimento do meio físico da região do lixão de São Carlos - SP, através de estudos geológicos, geofísicos, topográficos e químicos.** Dissertação—Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos: Universidade de São Paulo, 2000.

ARAÚJO, A. G. DE M. As propriedades físicas dos arenitos silicificados e suas implicações na aptidão ao lascamento. **Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia**, n. 2, p. 63–74, 13 dez. 1992.

BRAGA, A. C. DE O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica - formações Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro – SP.** Tese—Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 1997.

BRAGA, A. C. DE O. **Métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática.** Tese de livre-docência—Rio Claro: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2006.



BRAGA, A. C. DE O. **Métodos Geométricos em Hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BRAHMI, S. et al. Assessment of groundwater and soil pollution by leachate using electrical resistivity and induced polarization imaging survey, case of Tebessa municipal landfill, NE Algeria. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, n. 4, p. 13, fev. 2021.

BRASIL. CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL DE 1988. 1988.

BRASIL. 12.305. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. . 3 ago. 2010.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS, 2020a.

BRASIL. 14.026. LEI Nº 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei 9.984 de 17 de julho de 2000. 15 jul. 2020 b.

CARPENTER, P. J.; KAUFMANN, R. S.; PRICE, B. Use of Resistivity Soundings to Determine Landfill Structure. **Groundwater**, v. 28, n. 4, p. 569–575, 1990.

CETESB. **Águas Subterrâneas: Aquífero Bauru**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/programa-de-monitoramento/consulta-por-aquiferos-monitorados/aquifero-bauru/>>. Acesso em: 23 jul. 2022.

CHENITI, H. **La Gestion Des Dechets Urbains Solides : Cas De La Ville D’annaba**. Tese—Mines: Faculté des Sciences de la Terre, 2014.

COCKETT, R. et al. SimPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications. **Computers & Geosciences**, v. 85, p. 142–154, 1 dez. 2015.

COCKETT, R.; HEAGY, L.; OLDENBURG, D. Pixels and their neighbors: Finite volume. **The Leading Edge**, v. 35, p. 936–939, 1 ago. 2016.

CORRÊA, C. R. S. et al. Landfills as risk factors for respiratory disease in children. **Jornal de Pediatria**, v. 87, n. 4, p. 319–324, 2011.

DEGROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. Occam’s inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. **GEOPHYSICS**, v. 55, n. 12, p. 1613–1624, dez. 1990.

DELORRAINE, A. et al. Case-control assessment of the short-term health effects of an industrial toxic waste landfill. **Environmental Research**, v. 68, n. 2, p. 124–132, 1995.

ELLIS, R. G.; OLDENBURG, D. W. Applied geophysical inversion. **Geophysical Journal International**, v. 116, n. 1, p. 5–11, 1994.

EUROSTAT. **Municipal waste by waste management operations. European Commission.** Disponível em: <[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/all\\_themes](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/all_themes)>. Acesso em: 1 out. 2022.

FACHIN, S. J. DA S. **Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto-SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema.** text—São Paulo: Universidade de São Paulo, 14 set. 2007.

FACINCANI, E. M. **Morfotectônica da Depressão Periférica Paulista e Cuesta Basáltica: Regiões de São Carlos, Rio Claro e Piracicaba.** Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 2000.

FEITOSA, F. A. C. et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. Rio de Janeiro: 2008.

FERNANDES, A. J. et al. Estratigrafia dos Derrames de Basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto - SP) Baseada na Geologia Física, Petrografia e Geoquímica. **Geologia USP. Série Científica**, v. 10, n. 2, p. 73–99, 1 jul. 2010.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. REVISÃO ESTRATIGRÁFICA DA PARTE ORIENTAL DA BACIA BAURU (NEOCRETACEO). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 717–728, 1 dez. 2000.

FIPAI. **Estudo de Impacto Ambiental do aterro sanitário para a disposição final de resíduos sólidos do município de São Carlos/SP.** São Carlos: Secretaria Municipal de Meio Ambiente, Ciência, Tecnologia e Inovação, 2010.

FIPAI. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São Carlos (PMGIRS/SC): Caracterização Geral do Município de São Carlos.** Prefeitura Municipal de São Carlos: Secretaria Municipal de Meio Ambiente, Ciência, Tecnologia e Inovação, 2020.

FOLLE, D. **O estudo geoestatístico de sondagens SPT para geração de mapas auxiliares em obras de engenharia.** Dissertação—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

FONTELES, H. R. DA N. **Caracterização geotécnica do subsolo da porção nordeste do município de Fortaleza (CE) com base em geoestatística.** Dissertação—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2003.

FRÉSCA, F. R. C. **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física.** Dissertação—Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007.

GADOTTI, R. F. **Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao lixão da cidade de São Carlos.** Dissertação—Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos: Universidade de São Paulo, 17 dez. 1997.

GALDEANO, L. R. **Aplicação do método da eletrorresistividade na investigação de plumas de contaminação em aterros sanitários.** Trabalho de Conclusão de Curso—Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 2016.

GALLAS, F. et al. Induced polarization, resistivity, and self-potential: a case history of contamination evaluation due to landfill leakage. **Environmental Earth Sciences**, v. 63, n. 2, p. 251–261, 1 maio 2011.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F.; CRUZ, F. A. R. Selection of an area for a sanitary landfill over the Guarani Aquifer, Sao Paulo State, Brazil. 2006.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geolétrico na investigação rasa**. Tese—Instituto de Geociências, São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007.

GESICKI, A. L. D. **Evolução Diagenética das Formações Pirambóia e Botucatu (Sistema Aquífero Guarani) no Estado de São Paulo**. Tese—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer: User's Guide**. 2021.

GONÇALVES, A. R. L. **Geologia ambiental da área de São Carlos**. Tese—São Paulo: Universidade de São Paulo, 1986.

GONÇALVES, A. R. L.; BOSSOLAN, N. R. S.; ORLANDO, M. J. G. DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DO FLUXO DE FREÁTICO NO ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS. **7 Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, p. 114–118, 1992.

GRIFFITHS, D. H.; KING, R. F. **Applied Geophysics for Geologists and Engineers**. 2. ed. [s.l.] Pergamon Press, 1981.

HAN, Z. et al. A review of groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in China. **Science of The Total Environment**, v. 569–570, p. 1255–1264, 2016.

HERMAN, R. An introduction to electrical resistivity in geophysics. **American Journal of Physics**, v. 69, p. 943–952, 1 set. 2001.

IBGE, I. B. DE G. E. E. **Atlas saneamento. Cap. 9**. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=253096&view=detalhes>>. Acesso em: 2 out. 2021.

INÁCIO, C. DE T.; BETTIO, D. B.; MILLER, P. R. M. **O papel da compostagem de resíduos orgânicos urbanos na mitigação de emissões de metano**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Embrapa Solos, 2010. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/882162/o-papel-da-compostagem-de-residuos-organicos-na-mitigacao-de-emissoes-de-metano>>. Acesso em: 17 fev. 2023.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)**. 2014.

ISRIL, M. et al. Direct determination of aquifer configuration using geoelectrical techniques in a piedmont zone, Himalayan foothills region, India. **Current Science**, v. 92, n. 9, p. 1293–1297, 2007.

JHAMNANI, B.; SINGH, S. Groundwater Contamination due to Bhalaswa Landfill Site in New Delhi. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, v. 1, n. 3, p. 5, 2009.

KAZA, S. et al. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank. **Urban Development Series. Washington, DC: World Bank**, p. 38, 2018.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KELLY, W. E. Geoelectric Sounding for Delineating Ground-Water Contamination. **Groundwater**, v. 14, n. 1, p. 6–10, 1976.

KRISTANTO, G. A.; KOVEN, W. Estimating greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Depok, Indonesia. **City and Environment Interactions**, v. 4, p. 8, 1 dez. 2019.

KRISTIANSEN, H. **Induced Polarization and Complex Resistivity Effects in Soils**. Dissertação—Dinamarca: Aalborg University, 1997.

LAGO, A. L. et al. Geophysical investigation using resistivity and GPR methods: a case study of a lubricant oil waste disposal area in the city of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil. **Environmental Geology**, v. 58, n. 2, p. 407–417, 2009.

LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. UNESP/Rio Claro, 2000.

LEROUX, V.; DAHLIN, T.; SVENSSON, M. Dense resistivity and induced polarization profiling for a landfill restoration project at Härlöv, Southern Sweden. **Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA**, v. 25, n. 1, p. 49–60, 2007.

LOKE, M. H. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies A practical guide to 2-D and 3-D surveys**. Malaysia, 1999. Disponível em: <[https://www.academia.edu/11991713/Electrical\\_imaging\\_surveys\\_for\\_environmental\\_and\\_engineering\\_studies\\_A\\_practical\\_guide\\_to\\_2\\_D\\_and\\_3\\_D\\_surveys](https://www.academia.edu/11991713/Electrical_imaging_surveys_for_environmental_and_engineering_studies_A_practical_guide_to_2_D_and_3_D_surveys)>. Acesso em: 17 fev. 2023.

LOKE, M. H.; ACWORTH, I.; DAHLIN, T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. **Exploration Geophysics**, v. 34, n. 3, p. 182–187, 1 jun. 2003.

MASSOLI, M. **Caracterização Litofaciológica das Formações Pirambóia e Botucatu, em Subsuperfície, no Município de Ribeirão Preto (SP), e sua Aplicação na Prospecção de Águas Subterrâneas**. Tese—Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 2007.

MAZAC, O.; KELLY, W. E.; LANDA, I. Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies. **Journal of Hydrology**, v. 93, n. 3, p. 277–294, 1987.

MENEZES, D. B. **Diagnóstico dos impactos do lixão de São Carlos (SP) no meio físico**.

Dissertação—Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos: Universidade de São Paulo, 1995.

MIURA, G. C. M. et al. **Estudo sobre relação entre a resistividade elétrica e fatores que causam sua alteração em meios contaminados por hidrocarbonetos e churume.** . Em: 13TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY & EXPOGEF. Rio de Janeiro, Brasil: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2013. Disponível em: <<https://library.seg.org/doi/10.1190/sbgf2013-050>>. Acesso em: 17 fev. 2023

MONDELLI, G. et al. Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. **Environmental Geology**, v. 52, n. 5, p. 871–887, 2007.

MYHRE, G. et al. **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing: Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [s.l.] Cambridge University Press, 2013.

NETO, A. C. DE S. **Utilização de Métodos Geométricos na Caracterização de Célula Experimental no Aterro de Resíduos Urbanos Delta-A em Campinas - SP.** Dissertação—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, J. P. L. **Caracterização da pluma de contaminação numa lixeira com o método de resistividade elétrica.** Dissertação—Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2009.

PELINSON, N. DE S.; OLIVEIRA, K. B. DE; WENDLAND, E. C. **MOBILIZAÇÃO DE POLUENTES DE LIXIVIADO GERADO EM UM LIXÃO DESATIVADO.** Águas Subterrâneas. **Anais...2019.** Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29674>>. Acesso em: 17 fev. 2023

PERRONI, J. C. A.; WENDLAND, E. C. **AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA E EXPLOTAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM SÃO CARLOS - SP.** **Águas Subterrâneas**, v. 22, n. 1, 8 jun. 2008.

PHILIPPE, F.; CULOT, M. Household solid waste generation and characteristics in Cape Haitian city, Republic of Haiti. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 2, p. 73–78, 1 dez. 2009.

QASIM, M. et al. Impact of landfill garbage on insect ecology and human health. **Acta Tropica**, v. 211, p. 6, 2020.

REGATTIERI, C. R. **Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário: estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos.** Tese—[s.l.] Universidade de São Paulo, 16 out. 2009.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.** 2. ed. [s.l.] John Wiley and Sons, 2011.

RICCOMINI, C. Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da formação Itaqueri na porção centro-leste do Estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, v. 18, n. 1–2, p. 41–48, 1997.

SASAKI, Y. Resolution of Resistivity Tomography Inferred from Numerical Simulation. **Geophysical Prospecting**, v. 40, n. 4, p. 453–463, 1992.

SCHETTINI, L. **Avaliação de aspectos geológicos e geotécnicos na implantação do aterro sanitário de São Carlos - SP, com o auxílio da geofísica**. Dissertação—Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos: Universidade de São Paulo, 2016.

SHINZATO, M. P. B. **Mobilização de poluentes no maciço de resíduos de lixão desativado**. Tese—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2014.

SILVA, C. P. L. DA. **Cartografia geotécnica de grande escala : estudo de caso Brasília - área tombada pela UNESCO**. Dissertação—Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília: Universidade de Brasília, 2007.

SISINNO, C. L. S. Disposição em aterros controlados de resíduos sólidos industriais não-inertes: avaliação dos componentes tóxicos e implicações para o ambiente e para a saúde humana. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 19, n. 2, p. 369–374, 2003.

SOARES, P. C. Divisão Estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 5, p. 229–251, 1975.

SOARES, P. V. et al. Mapa de infiltração do alto e médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos do meio físico e na precipitação. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 3, n. 1, p. 26–42, 1 maio 2008.

SOUPIOS, P. et al. Investigation of waste disposal areas using electrical methods: a case study from Chania, Crete, Greece. **Environmental geology**, v. 51, n. 7, p. 1249–1261, 2007.

STOLLAR, R. L.; ROUX, P. Earth Resistivity Surveys - A Method for Defining Ground-Water Contamination. **Ground Water**, v. 13, n. 2, p. 145–150, 1975.

SUMNER, J. S. **Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration**. [s.l.] Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. [s.l.] Cambridge University Press, 1990.

USTRA, A. T. **Utilização dos métodos eletroresistividade e polarização induzida com aquisição de dados 3D para caracterização geoambiental de uma área à jusante do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru-SP**. Dissertação—[s.l.] Universidade de São Paulo, 28 mar. 2008.

VELOZO, R. **Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos-SP, com auxílio da geofísica**. Dissertação—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006.

WORLD BANK. **Solid Waste Management**. Disponível em: <<https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>>. Acesso em: 13 set. 2022.

WU, F.-T.; CAETANO-CHANG, M. R. Estudo mineralógico dos arenitos das formações

Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste do Estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, v. 13, n. 1, p. 58–68, 1 jun. 1992.

ZHAO, H. **Methane Emissions from Landfills**. Dissertação—Department of Earth and Environmental Engineering: Columbia University, 2019.

ZOHDY, A. A. R.; EATON, G. P.; MABEY, D. R. **Application of surface geophysics to ground-water investigations**Application of surface geophysics to ground-water investigations: Techniques of Water-Resources Investigations. [s.l.] U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey: U.S. Govt. Print. Off., 1974. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/twri02D1>>. Acesso em: 17 fev. 2023.

ZUBERI, M. J. S.; ALI, S. F. Greenhouse effect reduction by recovering energy from waste landfills in Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 117–131, 2 jan. 2015.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Análise da relação entre disposição de rejeitos de baixa periculosidade e meio geológico receptor**. REGEO. Anais... Em: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS. Rio de Janeiro: 1991.

# **ANEXO I**

Seções de resistividade e cargabilidade das linhas de caminhamento elétrico



### Lixão Desativado

Figura I. 1 - Inversão dos dados de resistividade da linha 0

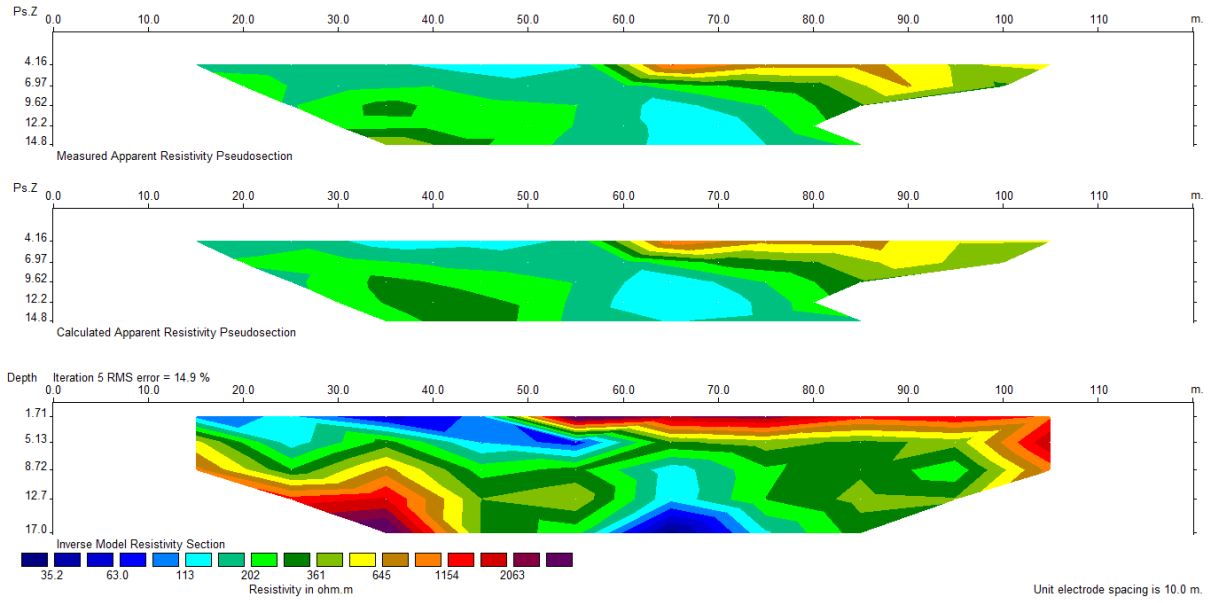


Figura I. 2 - Inversão dos dados de cargabilidade da linha 0

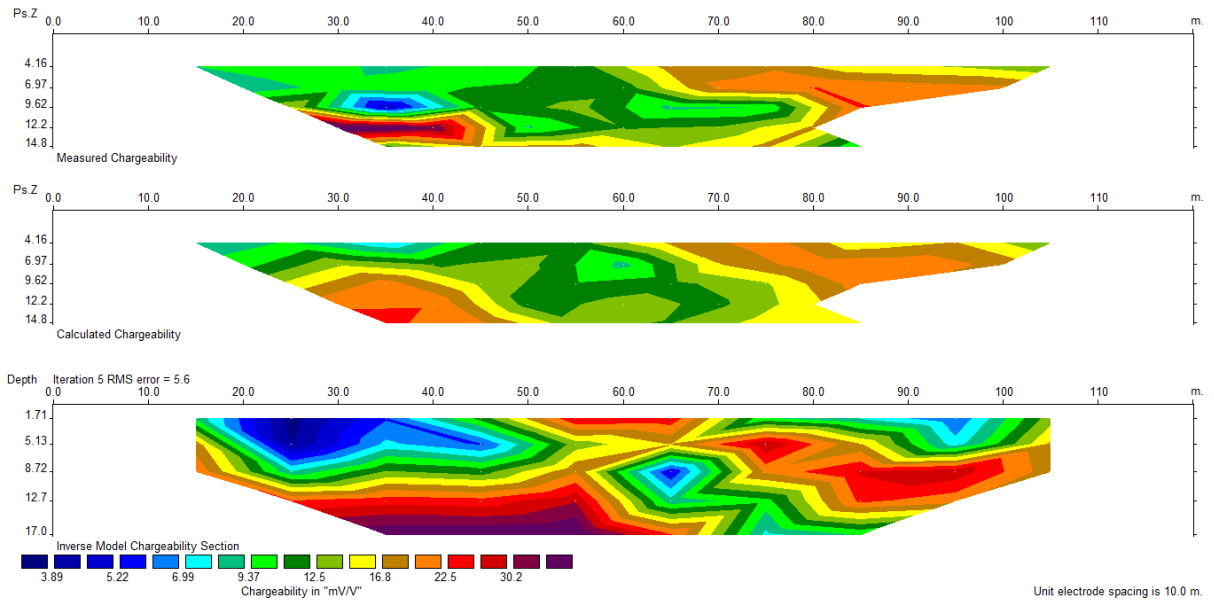


Figura I. 3 - Inversão dos dados de resistividade da linha 1

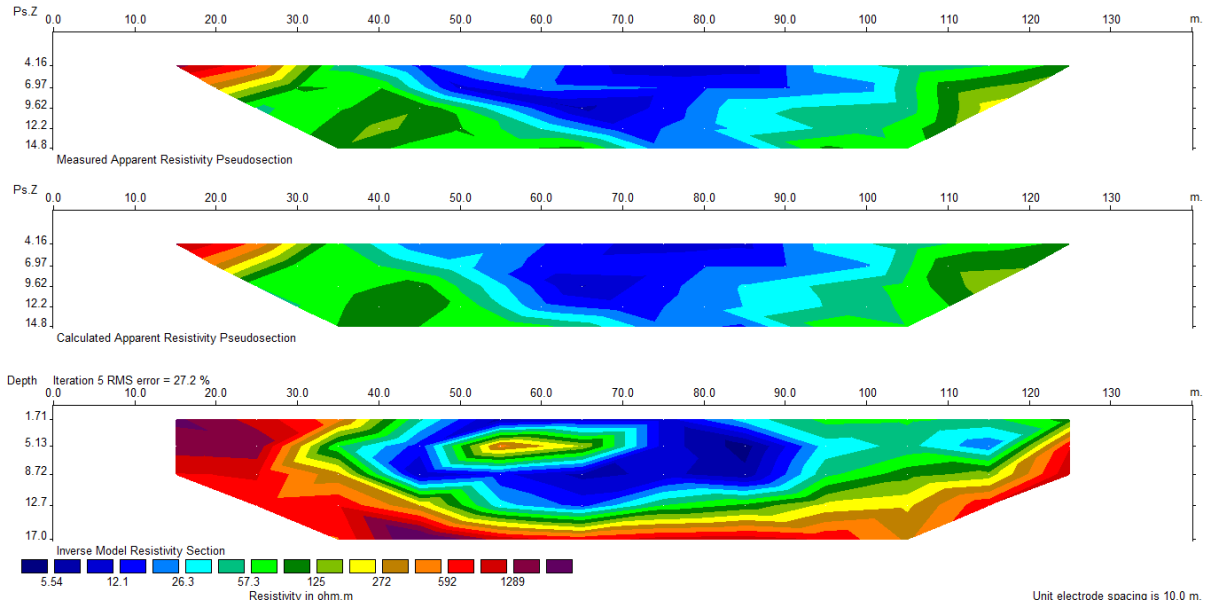


Figura I. 4 - Inversão dos dados de cargabilidade da linha 1

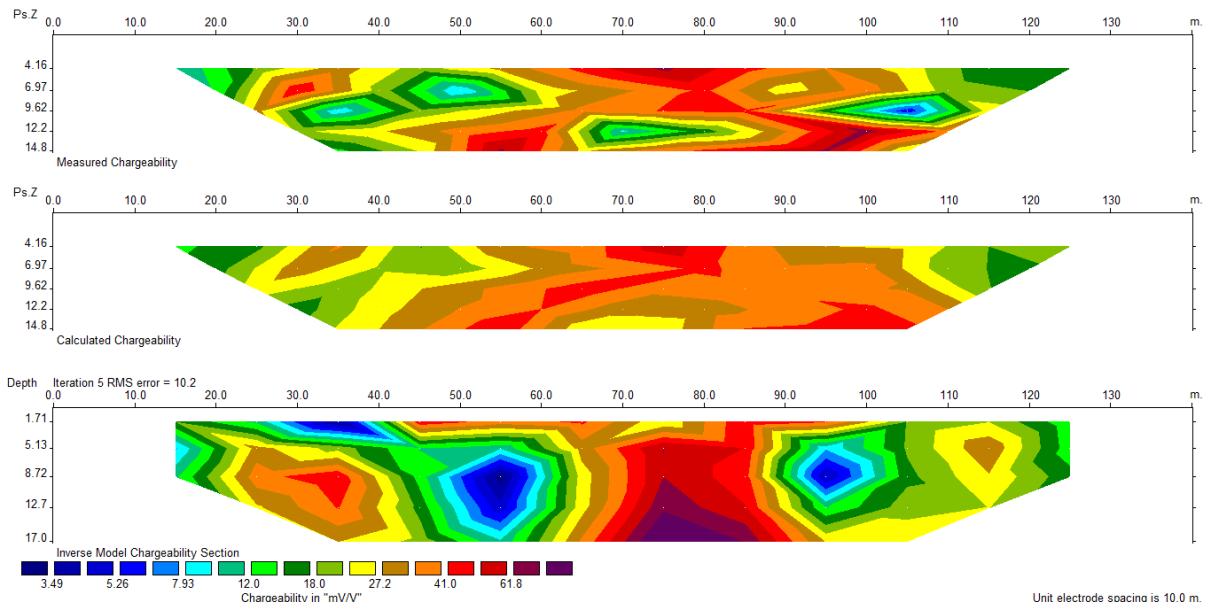


Figura I. 5 - Inversão dos dados de resistividade da linha 2

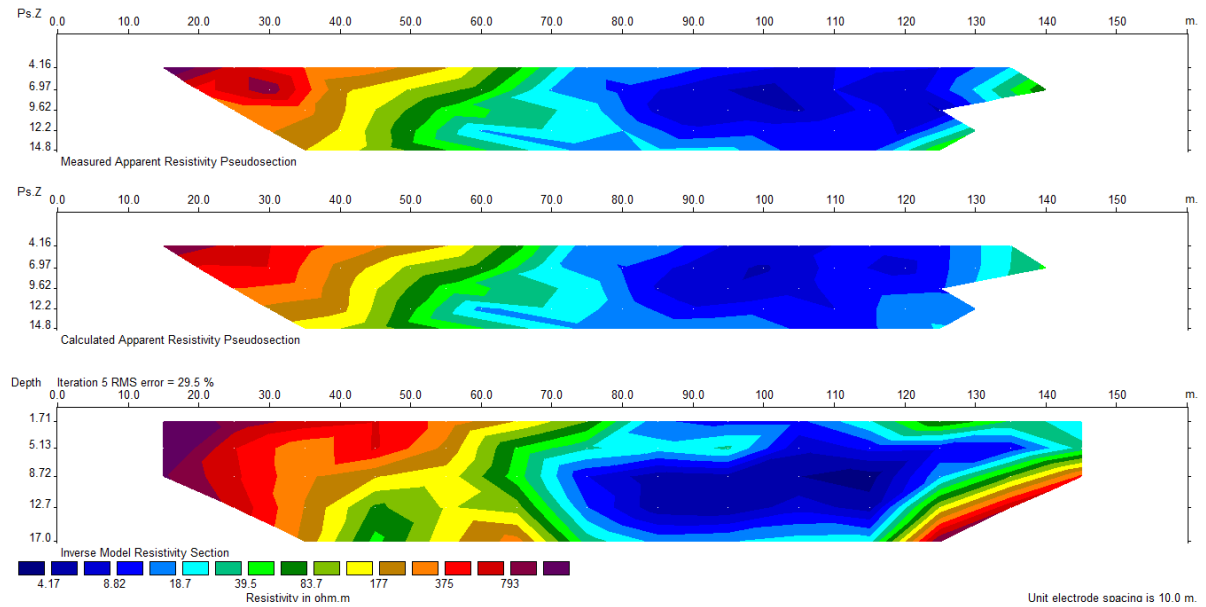


Figura I. 6 - Inversão dos dados de cargabilidade da linha 2

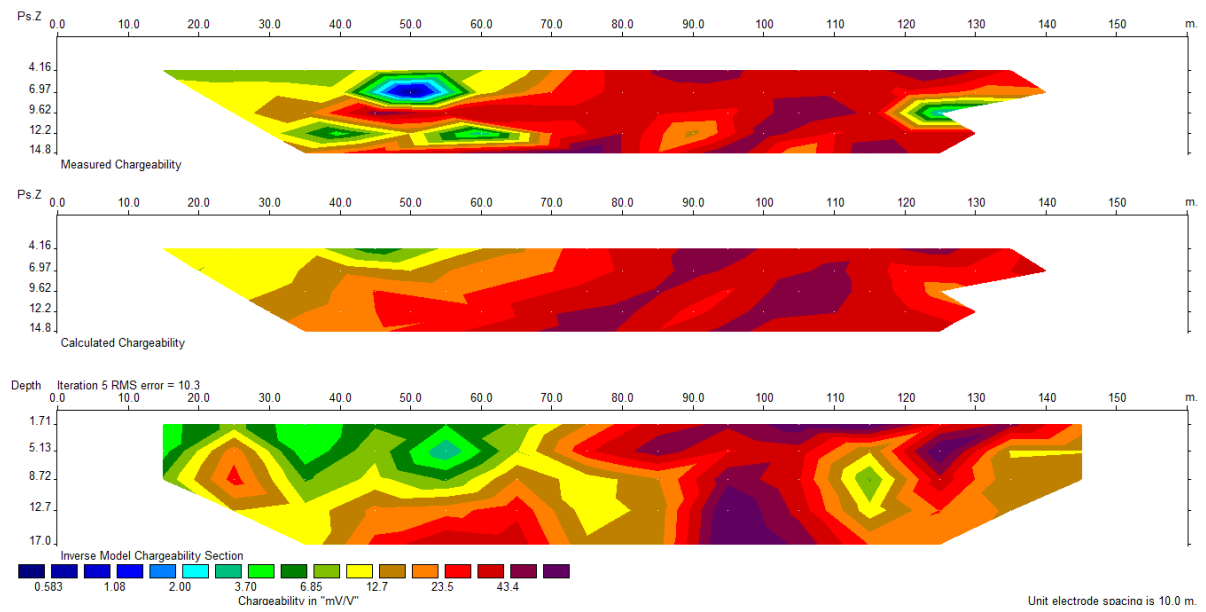


Figura I. 7 - Inversão dos dados de resistividade da linha 3

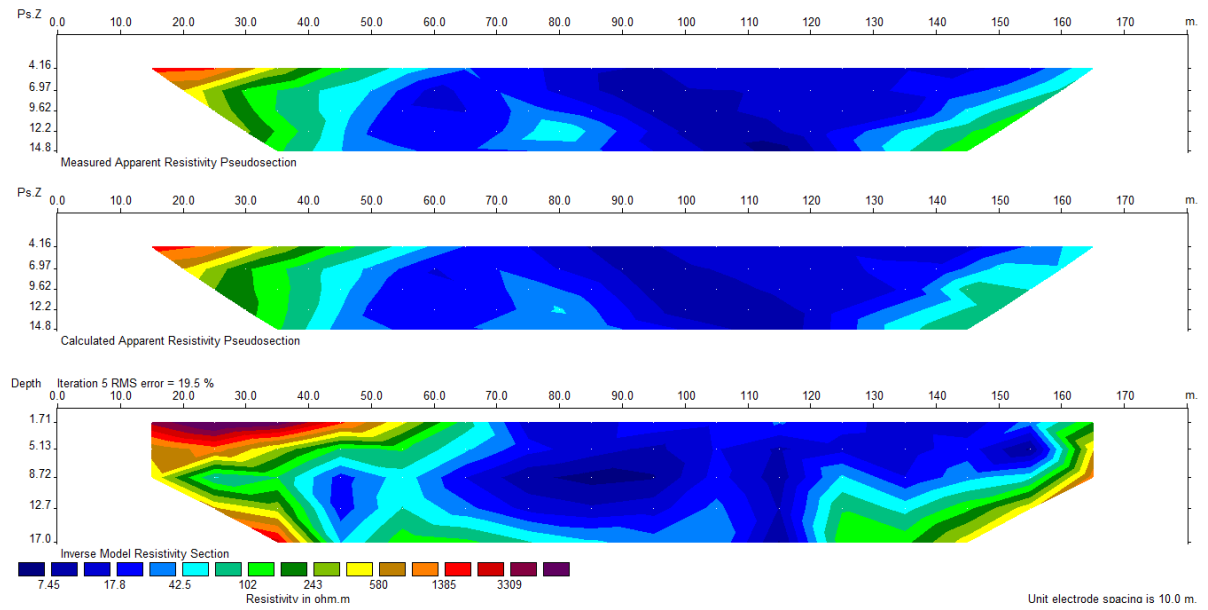


Figura I. 8 - Inversão dos dados de cargabilidade da linha 3

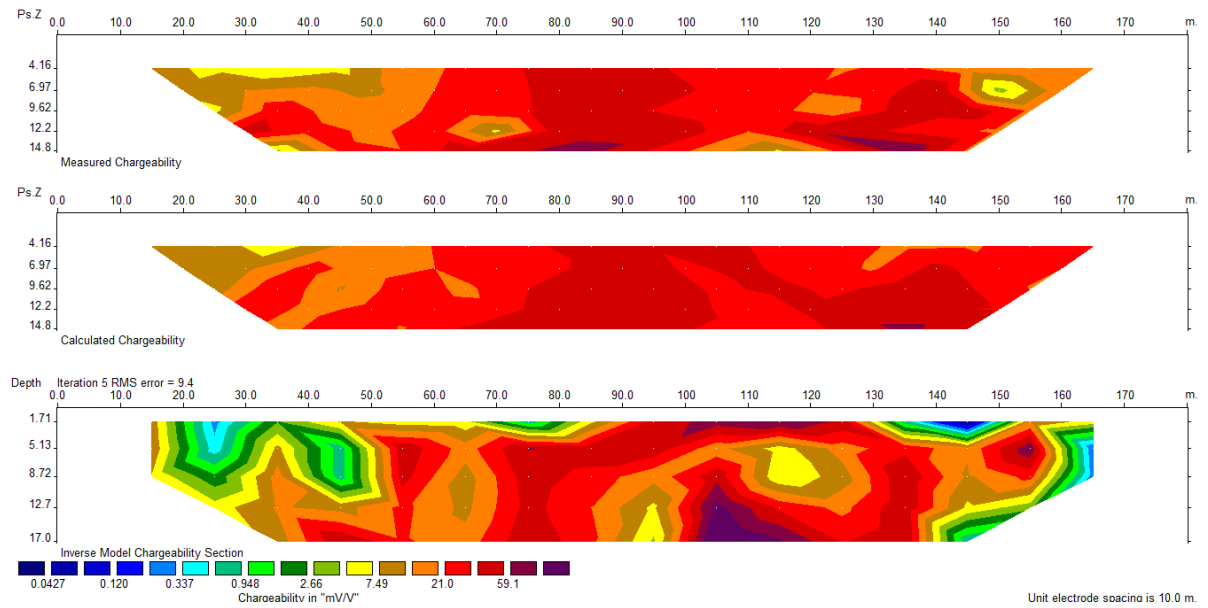


Figura I. 9 - Inversão dos dados de resistividade da linha 4

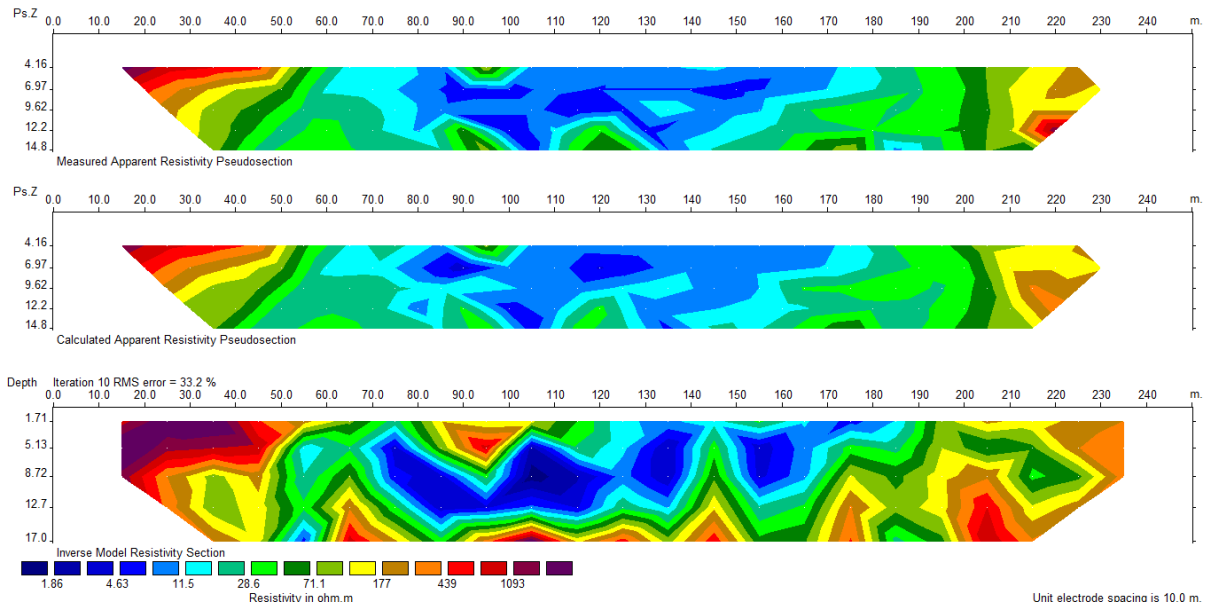


Figura I. 10 - Inversão dos dados de cargabilidade da linha 4

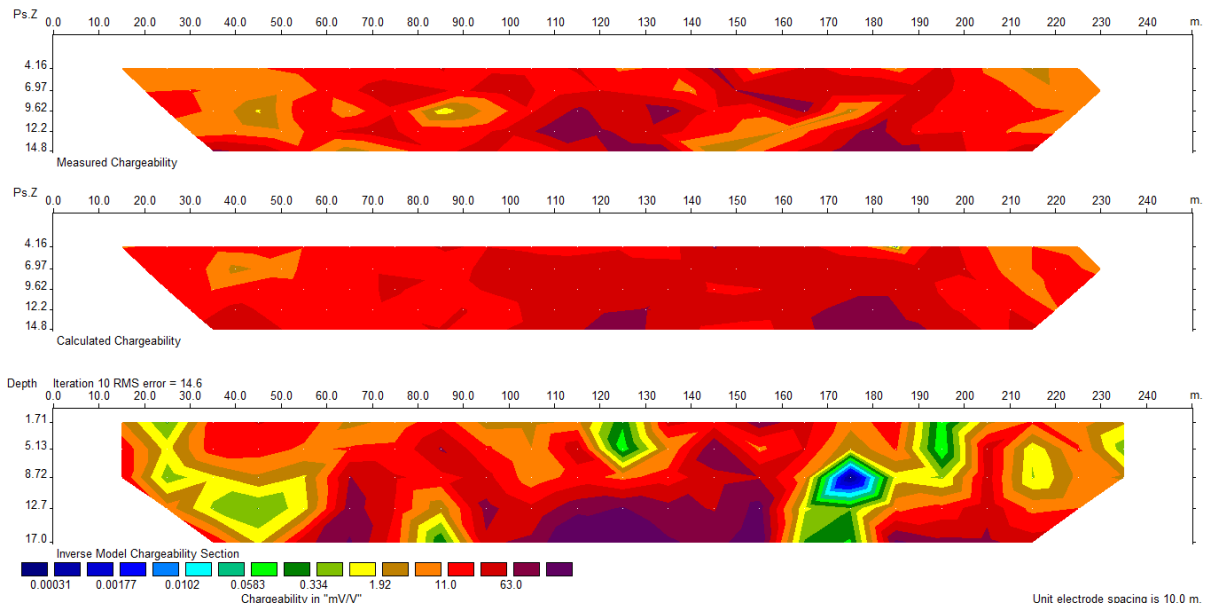


Figura I. 11 - Inversão dos dados de resistividade da linha 5

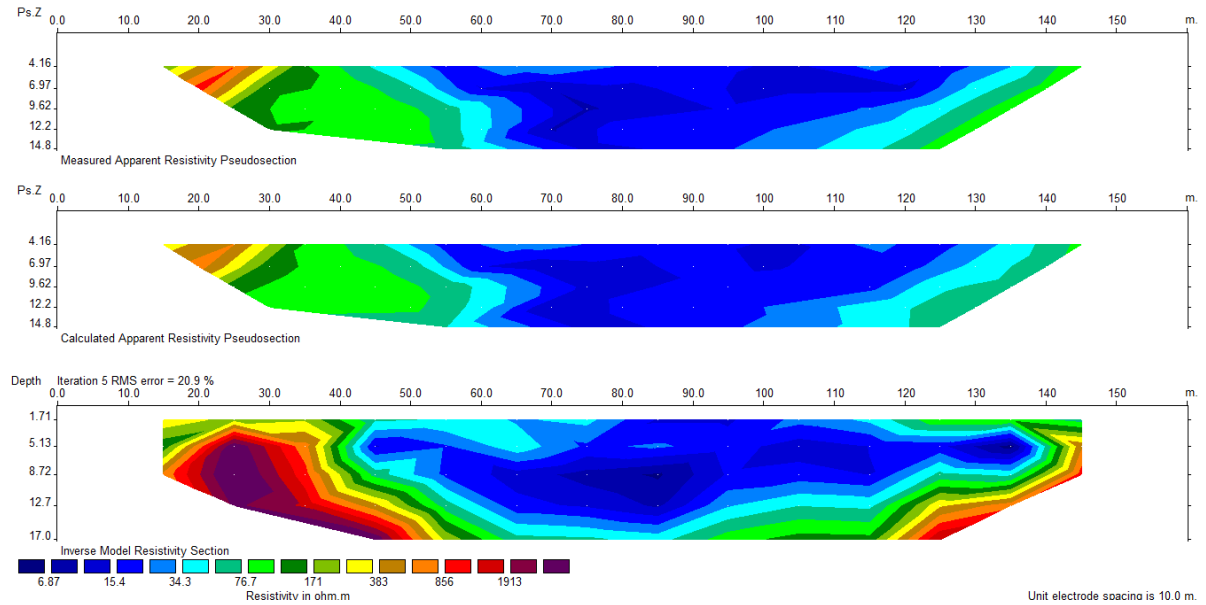
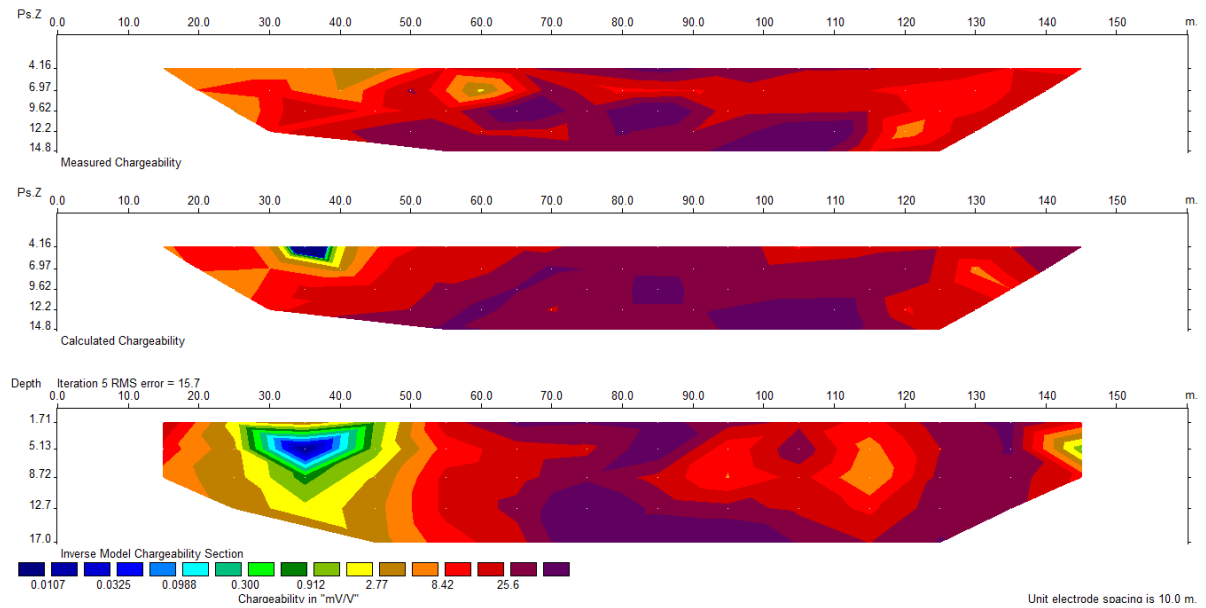


Figura I. 12 - Inversão dos dados de cargabilidade da linha 5



### Aterro Sanitário

Figura I. 13 - Inversão dos dados de resistividade da linha A

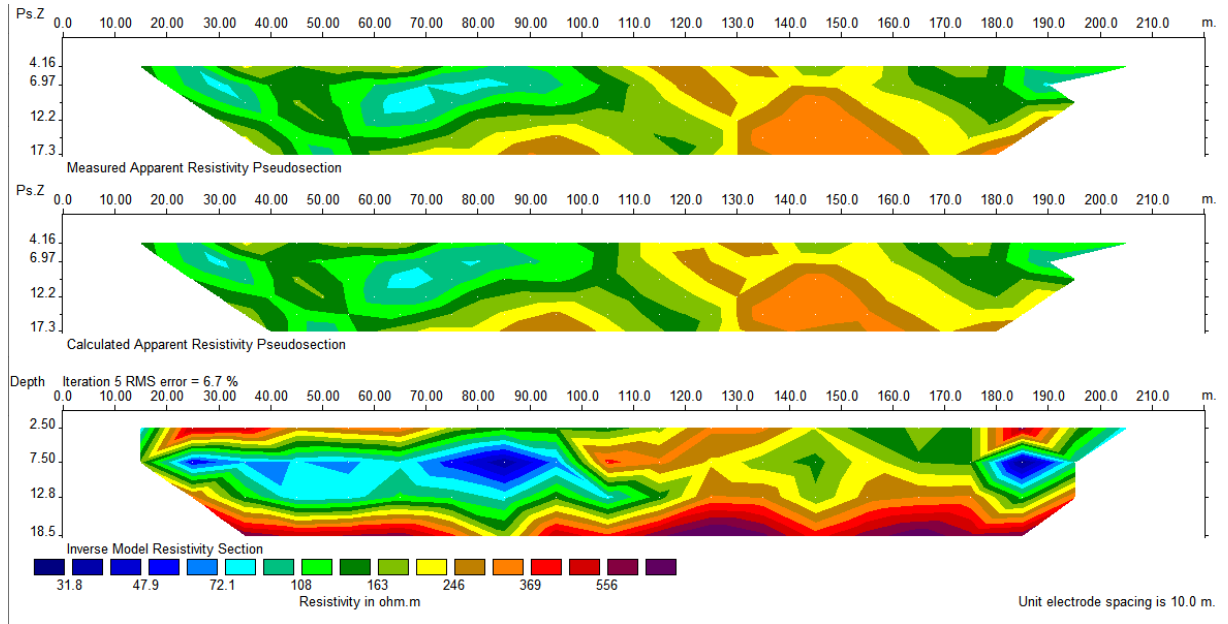


Figura I. 14 - Inversão dos dados de resistividade da linha B

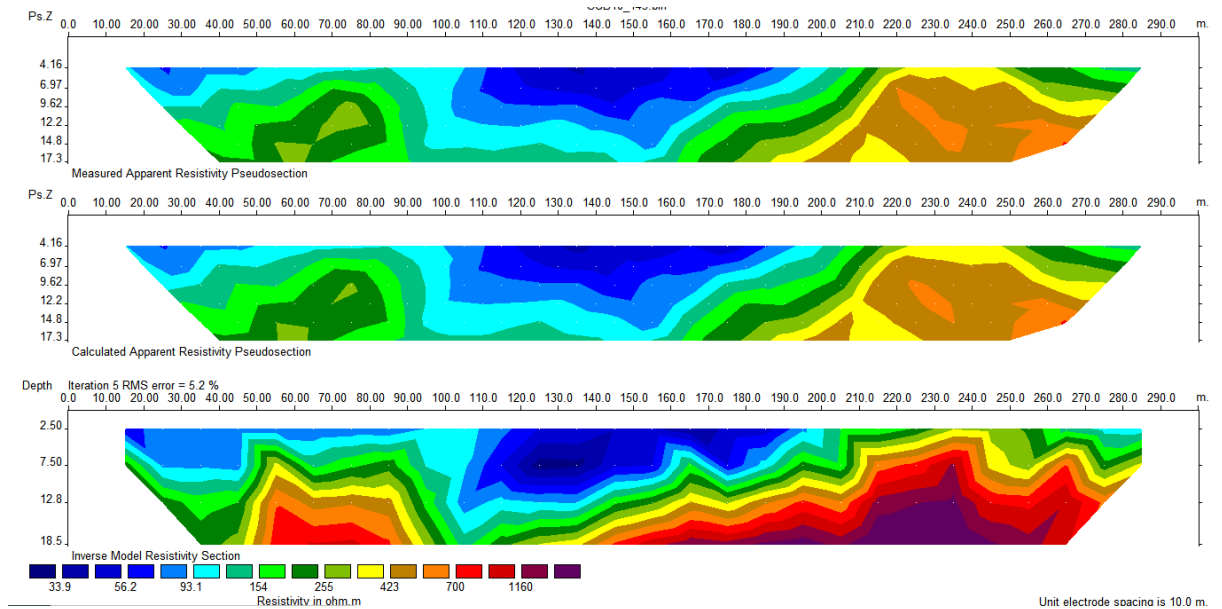


Figura I. 15 - Inversão dos dados de resistividade da linha D

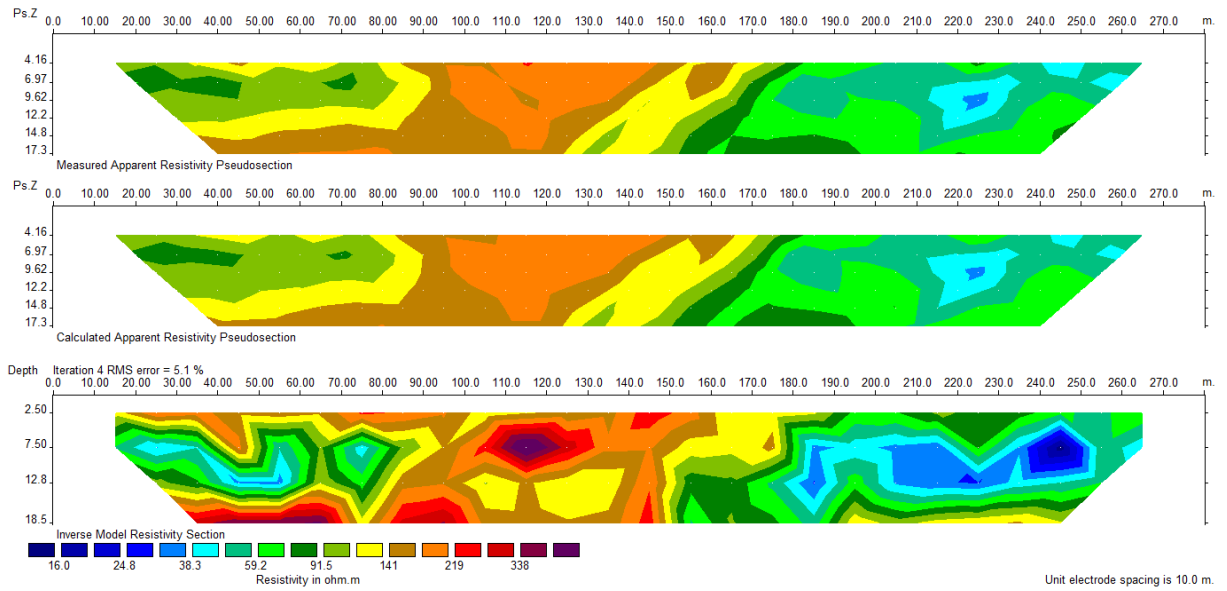


Figura I. 16 - Inversão dos dados de resistividade da linha E

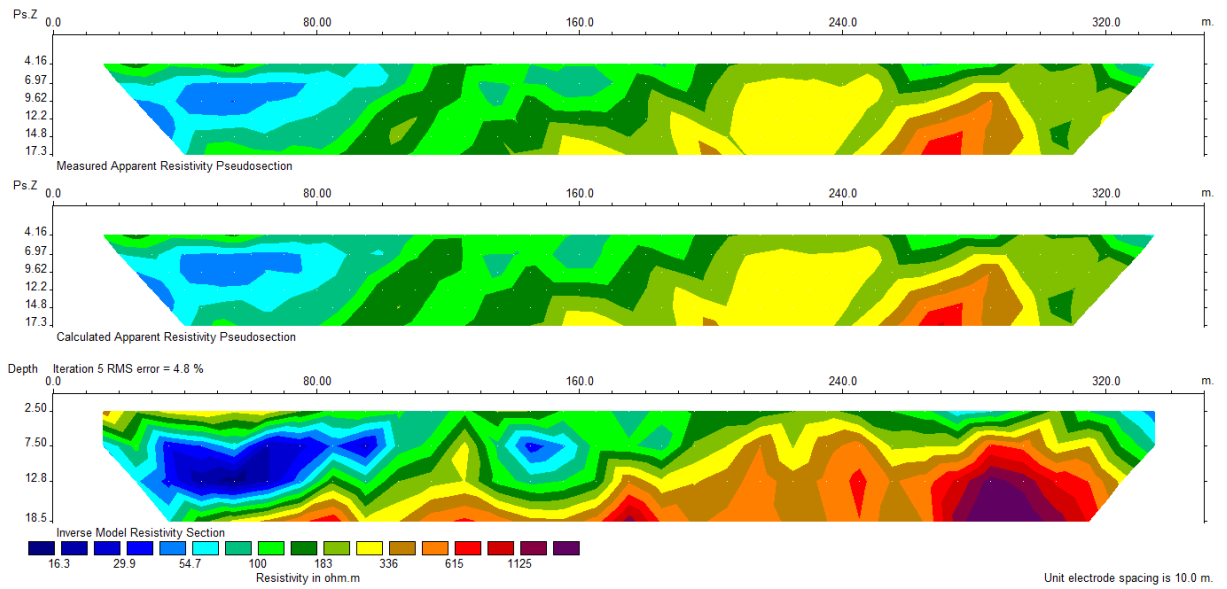




Figura I. 17 - Inversão dos dados de resistividade da linha F

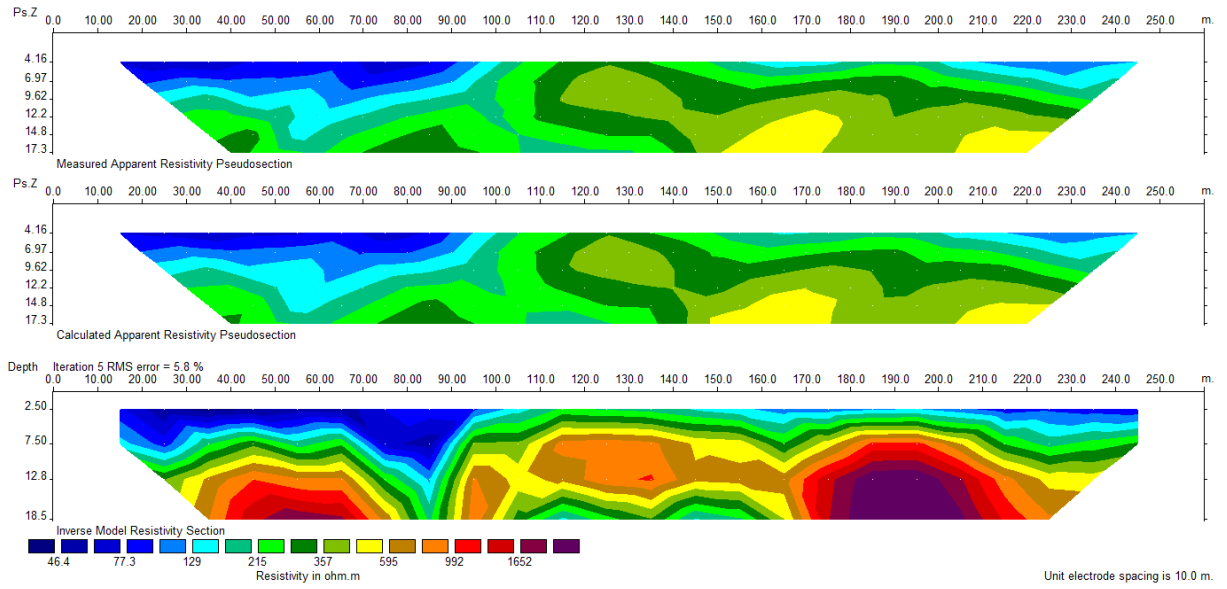
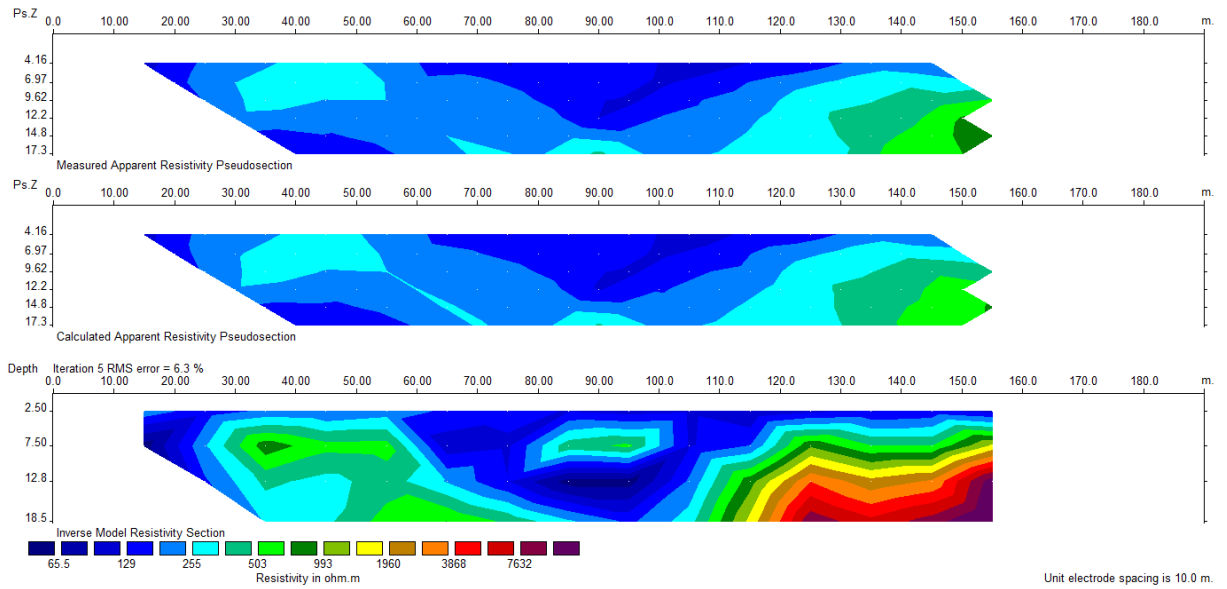


Figura I. 18 - Inversão dos dados de resistividade da linha G



## **ANEXO II**

Dados compilados das sondagens SPT e ensaios geolétricos, usados para gerar o mapa de topo do diabásio da Figura 35

Tabela 4 – Dados utilizados para obter o mapa de profundidade do diabásio

Nomenclatura	Coordenada X	Coordenada Y	Profundidade do diabásio (m)
P-1	190671,27	7559852,590	10,80
P-2	190732,590	7559864,730	17,00
P-3	190790,310	7559875,820	9,00
P-4	190829,920	7559882,850	3,80
P-5	190860,720	7559881,290	5,80
P-6	190644,180	7559550,530	16,50
P-7	190681,260	7559558,430	15,50
P-8	190710,350	7559564,890	19,50
P-9	190732,800	7559570,090	13,00
P-10	190772,680	7559580,820	7,50
P-11	190797,730	7559587,300	7,00
P-12	190817,610	7559589,800	10,50
P-13	190843,270	7559596,070	5,50
P-14	190636,680	7559690,770	10,00
P-15	190660,700	7559697,850	15,50
P-16	190673,260	7559698,330	15,50
P-17	190684,880	7559698,280	7,00
P-18	190714,940	7559700,370	5,00
P-19	190770,850	7559704,070	5,00
P-20	190809,020	7559704,790	10,50
P-21	190713,500	7559917,200	17,90
P-22	190719,690	7559918,470	9,40
P-23	190734,000	7559922,510	5,70
P-24	190756,270	7559931,620	5,00
P-25	190578,920	7559313,760	18,10
P-26	190591,740	7559313,920	18,50
P-27	190593,450	7559314,030	19,20
SP-01	190728,408	7559995,977	13,58
SP-02	190900,404	7559868,406	17,38
SP-03	190711,886	7559885,780	18,73
SP-04	190584,182	7559839,479	14,83
SP-05	190871,331	7559690,988	10,38
SP-06	190702,492	7559728,603	12,65
SP-07	190567,058	7559748,018	10,32
SP-08	190964,347	7559434,304	12,19
SP-09	190677,728	7559506,842	12,22
SP-10	190535,594	7559549,485	14,49
SP-11	190743,881	7559269,047	13,53
SP-12	190628,756	7559333,864	14,23
SP-13	190506,149	7559384,185	10,55
SP-14	190915,395	7559109,423	12,13
SP-15	190745,216	7558930,313	16,12
SP-16	190515,778	7558937,902	18,08
SP-17	190573,517	7559189,870	11,07