

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE GEOLOGIA**

EDUARDO DE CÓRDOVA SERPA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO ELETRORRESISTIVIDADE PARA
IDENTIFICAR ÁREAS CONTAMINADAS EM POSTO DE SERVIÇOS - NOVO
HAMBURGO/RS**

**São Leopoldo
2020**

EDUARDO DE CÓRDOVA SERPA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO ELETRORRESISTIVIDADE PARA
IDENTIFICAR ÁREAS CONTAMINADAS EM POSTO DE SERVIÇOS - NOVO
HAMBURGO/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Geologia, pelo Curso de Geologia da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Henrique Parisi Kern

Banca examinadora: Prof. Dra. Christie Helouise Engelmann de Oliveira
Prof. MSc. Thiago Peixoto de Araujo

São Leopoldo

2020

Dedico este trabalho ao meu filho Lorenzo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a minha mãe, avó e irmã pelo incentivo que sempre me deram ao longo da minha vida para que eu sempre estudasse e, também, minha esposa Renata Meira pela paciência e atenção que sempre teve comigo nas horas que precisei.

Ao amigo e também orientador Prof. Dr. Henrique P. Kern pela dedicação, o qual não mediu esforços para auxiliar-me em todas as etapas deste trabalho.

Ao Biol. Diego Hoffmeister (FEPAM), que foi fundamental pela ajuda na procura pelo posto de serviços para que fosse possível a realização do meu trabalho de conclusão.

O Geol. Leandro Leal pela ajuda nos levantamentos preliminares de campo e empréstimo do trado manual para aquisição das sondagens.

Ao Geol. José Carlos Gallo pela assistência na aquisição dos dados de campo que foram utilizados para este trabalho.

O Prof. Dr. Vagner R. Elis (USP) pelas explicações sobre modelamento de seções geelétricas.

Ao Biol. Rodrigo Ponzoni que, gentilmente, cedeu os dados diretos de análises químicas e demais materiais referentes ao posto de serviços.

O gerente do posto de serviços Claudiomiro dos Reis pela assessoria nos dias que precisei realizar os levantamentos de campo.

Aos colegas e amigos que disponibilizaram o seu tempo na ajuda para a coleta dos dados de campo: Lucas Reis, Samuel Saldanha Sarmiento, Gustavo Ferreira Canani e Clarissa Reis de Almeida.

RESUMO

Postos de serviços configuram potenciais fontes poluidoras de solos e águas subterrâneas, pois armazenam e manuseiam substâncias tóxicas e se encontram largamente distribuídos nas áreas urbanas. Os métodos geofísicos são amplamente utilizados na detecção de hidrocarbonetos em subsuperfície, pela sua maior cobertura de área, rapidez e baixo custo na aquisição dos dados. O objetivo central deste trabalho foi à caracterização geofísica por eletrorresistividade em uma área com histórico de contaminação por hidrocarbonetos derivados de petróleo. Foram realizadas 4 linhas paralelas de imageamento elétrico utilizando o arranjo dipolo-dipolo para a geração de modelos bidimensionais, tendo como área de estudo um posto de serviços localizado no município de Novo Hamburgo/RS. Os resultados dos modelos de resistividade sugerem, através de anomalias condutivas, a presença de contaminação e o fluxo subterrâneo de deslocamento do contaminante no aquífero local. Através dos contrastes das propriedades elétricas observadas em subsuperfície, foi possível identificar as porções das zonas não saturadas e saturadas, assim como a superfície potenciométrica do aquífero freático local, onde os dados indiretos se mostraram em concordância com os perfis de sondagens executadas e medidas de nível d' água em poços de monitoramento. Desta forma, a utilização da eletrorresistividade demonstrou ser eficaz na identificação das diferentes zonas presentes em subsuperfície, assim como na detecção de contaminação por derivados de petróleo em área urbana.

Palavras-chave: Geofísica. Eletrorresistividade. Posto de serviços. Contaminação. LNAPL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de distribuição de hidrocarbonetos em subsuperfície	16
Figura 2 - Condições que atuam na alteração da resistividade elétrica em ambientes contaminados por derivados de petróleo	18
Figura 3 - Modelo geoeletrico condutivo de pluma de LNAPL.....	20
Figura 4 - Princípio da aplicação do método geofísico eletrorresistividade com um arranjo de quatro eletrodos	22
Figura 5 - Arranjo dipolo-dipolo	25
Figura 6 - Mapa geológico da Bacia do Paraná com as Superseqüências Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru	26
Figura 7 - Mapa Geológico com as unidades que ocorrem na região da área de estudo	27
Figura 8 - Compartimentação do SAG no Estado do Rio Grande do Sul.....	29
Figura 9 - Distribuição das 4 linhas de IE	32
Figura 10 - Linhas de IE: A) 2D-L1; B) 2D-L2; C) 2D-L3 e D) 2D-L4.....	33
Figura 11 - A) Resistivímetro EEG AL-48; B) Aquisição dos dados de campo com o resistivímetro EEG AL-48.....	33
Figura 12 - Localização das sondagens SD-01, SD-02 e SD-03.....	35
Figura 13 - Sondagens de reconhecimento na área do posto de serviços. A) Trado manual usado para as perfurações; B) Perfuração do perfil de sondagem SD-02....	35
Figura 14 - Localização da área de estudo na cidade de Novo Hamburgo	36
Figura 15 - Mapa esquemático da área de estudo	38
Figura 16 - Perfis de sondagem SD-01, SD-02 e SD-03.....	43
Figura 17 - A) Aterro argilo-arenoso; B) Aterro areno-siltoso; C) Aterro de areia fina; D) Aterro areno-argiloso; E) Aterro argiloso; F) Solo argilo-arenoso.....	44
Figura 18 - Mapa potenciométrico da área do posto de serviços	45
Figura 19 - Seção Modelada de Imageamento Elétrico 2D-L1	48
Figura 20 - Seção Modelada de Imageamento Elétrico 2D-L2.....	50
Figura 21 - Seção Modelada de Imageamento Elétrico 2D-L3.....	51
Figura 22 - Seção Modelada de Imageamento Elétrico 2D-L4.....	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Compartimentação geomorfológica da região da área de estudo.	30
Quadro 2 – Principais eventos que ocorreram no decorrer dos últimos anos na área do posto de serviços	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre compostos BTEX e PAH.....	15
Tabela 2 - Valores de resistividades para alguns tipos litológicos.....	23
Tabela 3 - Dados de concentração dos compostos BTEX, PAH e TPH em análises químicas de águas em PMs na área do posto de serviços. Os resultados em vermelho representam concentrações acima dos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 420/2009 (*) e Lista Holandesa 2000 (**)	41
Tabela 4 - Profundidades do nível d' água em alguns PMs coletadas em 31/06/2020	46

LISTA DE SIGLAS

BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSAO	Caixa Separadora de Água e Óleo
DNAPL	Dense Nonaqueous Phase Liquids
GPR	Ground Penetrating Radar
IE	Imageamento Elétrico
LNAPL	Light Nonaqueous Phase Liquids
NAPL	Nonaqueous Phase Liquids
PAH	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
PM	Poço de Monitoramento
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
TPH	Hidrocarboneto Total de Petróleo
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 CONTAMINAÇÃO DE SOLOS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS POR COMPOSTOS ORGÂNICOS EM POSTOS DE SERVIÇOS	14
2.2 GEOFÍSICA APLICADA NA IDENTIFICAÇÃO DE PLUMAS DE CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS EM SUBSUPERFÍCIE	17
2.3 MÉTODO GEOFÍSICO ELETORRESISTIVIDADE	21
2.3.1 Imageamento elétrico	24
2.4 GEOLOGIA REGIONAL	25
2.4.1 Geologia local	27
2.5 HIDROGEOLOGIA	28
2.6 GEOMORFOLOGIA	30
2.7 CLIMA	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 LOCAÇÃO DOS PERFIS GEOFÍSICOS DE ELETORRESISTIVIDADE	31
3.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS	31
3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS	33
3.4 REALIZAÇÃO DE SONDAGENS DE RECONHECIMENTO	34
4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	36
4.1 LOCALIZAÇÃO	36
4.2 INFORMAÇÕES GERAIS E HISTÓRICO DO POSTO DE SERVIÇOS	37
4.3 SUBSUPERFÍCIE DA ÁREA DE ESTUDO	42
4.3.1 Aterros e solo	42
4.3.2 Águas subterrâneas	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 IMAGEAMENTO ELÉTRICO 2D-L1	47
5.2 IMAGEAMENTO ELÉTRICO 2D-L2	49

5.3 IMAGEAMENTO ELÉTRICO 2D-L3.....	50
5.4 IMAGEAMENTO ELÉTRICO 2D-L4.....	51
6 SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	53
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	55
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICE A – PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE MEDIDA E CALCULADA E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE REAL 2D-L1	62
APÊNDICE B – PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE MEDIDA E CALCULADA E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE REAL 2D-L2	63
APÊNDICE C – PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE MEDIDA E CALCULADA E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE REAL 2D-L3	64
APÊNDICE D – PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE MEDIDA E CALCULADA E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE REAL 2D-L4.....	65

1 INTRODUÇÃO

Vazamentos de hidrocarbonetos derivados de petróleo em postos de serviços constituem acidentes bastante preocupantes em razão da contaminação que causam em solos e águas subterrâneas. Isso está diretamente relacionado à deficiência de infraestrutura, falta de manutenção e desgastes dos sistemas de distribuição e armazenamento de combustíveis que existem nesses empreendimentos. Grande parte das áreas contaminadas por vazamentos resultam de tanques com avançado estado de oxidação e, muitas vezes, o problema é identificado somente após meses ou anos (MENEZES *et. al.*, 2011).

As empresas que investigam problemas ambientais normalmente utilizam apenas métodos diretos como sondagens, amostragens e análises químicas de solos e águas. Devido aos altos custos dos métodos diretos e maior tempo de execução, as técnicas indiretas de geofísica vêm cada vez mais auxiliando as etapas diretas em estudos de problemas ambientais envolvendo contaminação, pois tratam-se de métodos não invasivos e de rápida aquisição.

Segundo Minozzo (2009), dentre os métodos geofísicos, é possível ressaltar a aplicação de métodos geoeletricos no diagnóstico de contaminações em solos e águas subterrâneas, detecção e mapeamento da extensão da área afetada e levantamento de informações sobre a profundidade da zona saturada, sentido do fluxo d' água subterrânea e a profundidade do substrato rochoso inalterado.

Os resultados da interpretação dos dados geofísicos, associados com o modelo conceitual preliminar e dados históricos da área, podem direcionar e otimizar as etapas de instalação de poços de monitoramento (PM) e amostragem de solo e água subterrânea, minimizando trabalhos de investigação direta (BAESSA, 2007). Sendo assim, a utilização de técnicas geofísicas podem ser metodologias eficientes em ações de investigação, remediação e monitoramento de áreas contaminadas.

O método geofísico eletrorresistividade é utilizado amplamente em estudos ambientais envolvendo contaminação por compostos orgânicos (GANDOLFO, 2007). Esta tecnologia permite detectar diferentes contrastes elétricos entre água, solo e rocha contaminados e não contaminados (SEFA, 2015).

O ponto central deste trabalho é apresentar os resultados da aplicação do método geofísico eletrorresistividade, através da técnica de caminhamento elétrico,

para identificar áreas com histórico de contaminação por vazamento de combustível em um posto de serviços na cidade de Novo Hamburgo/RS.

O histórico de contaminação local está documentado através dos serviços de diagnóstico ambiental realizada por uma empresa do ramo, o qual contemplou as técnicas diretas de investigação como sondagens de reconhecimento, instalação de PMs, coletas de amostras de solo e águas subterrâneas. Atualmente essa mesma empresa opera um sistema de monitoramento e remediação no local, sendo que alguns resultados analíticos de água foram cedidos para a realização do presente estudo.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O posto de serviços estudado possui um longo histórico de contaminações causado por vazamentos de hidrocarbonetos derivados de petróleo. Os locais com maiores problemas envolvendo contaminantes estão nas proximidades da área de tancagem e na parte SW do empreendimento, a jusante das áreas de abastecimento e tancagem.

Já foram realizados diversos trabalhos de remediação na área para a redução desses compostos orgânicos em subsuperfície onde, devido ao projeto de remediação implantado no local, já se observa uma considerável atenuação desses contaminantes no aquífero freático local.

Porém, esses contaminantes derivados de petróleo podem mover-se no sentido do fluxo d' água subterrânea e, também, estarem presentes em outras porções do subsolo devido à flutuação do lençol freático (ATEKWANA, E.; ATEKWANA, E., 2010). Nesse sentido, ocorre à necessidade de uma ampla cobertura espacial da área historicamente afetada, onde optou-se o emprego da geofísica como ferramenta no processo de identificação de contaminantes em subsuperfície.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho propõe utilizar a geofísica para a identificação de áreas contaminadas por derivados de hidrocarbonetos em um posto de serviços.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) analisar a relação entre possíveis contrastes de resistividade elétrica com os dados diretos existentes;
- b) identificar áreas contaminadas e não contaminadas em subsuperfície;
- c) testar a eficácia da geofísica na identificação de contaminação em subsuperfície.

1.3 JUSTIFICATIVA

A importância da utilização da geofísica nesse trabalho está baseada na tentativa a identificação indireta, em subsuperfície, de áreas contaminadas por vazamentos de combustíveis, já detectados anteriormente por análises químicas em alguns PMs na área do posto de serviços.

A escolha do método geofísico eletrorresistividade se deve na eficácia do uso desta ferramenta para a detecção de compostos orgânicos em subsuperfície (SEFA, 2015). Instrumentos geofísicos são amplamente conhecidos e utilizados para delineamento de contaminantes no meio subterrâneo, orientando com considerável precisão o posicionamento de sondagens e PMs (MARQUES, 2007).

O fato de esta técnica fornecer dados contínuos sobre o local estudado, permitindo assim uma análise temporal e espacial mais detalhada, otimiza a coleta de dados diretos advindos de sondagens, instalação de poços e coletas de amostras para análise química, reduzindo também o custo da investigação ambiental (ELIS, 1999).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONTAMINAÇÃO DE SOLOS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS POR COMPOSTOS ORGÂNICOS EM POSTOS DE SERVIÇOS

Uma área contaminada pode ser definida como uma área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação. Essas substâncias podem ter sido depositadas, acumuladas, armazenadas, enterradas ou infiltradas de forma planejada, acidental ou natural. Os contaminantes podem concentrar-se nas zonas saturada e não saturada, como em solos, sedimentos, rochas e águas superficiais e subterrâneas (CETESB, 2020).

Segundo Costa (2012) as contaminações mais comuns que ocorrem em postos de serviços são resultantes de derramamentos junto às bombas e bocais durante o abastecimento de veículos, infiltrações no piso do posto e vazamentos na área de tancagem (por corrosão, falhas estruturais e problemas em tubulações conectadas aos tanques).

Os hidrocarbonetos derivados de petróleo são compostos orgânicos formados, basicamente, por hidrogênio e carbono, podendo conter em suas cadeias átomos de oxigênio, nitrogênio e enxofre (SOUZA e LUIZ, 2017). Os principais combustíveis derivados de petróleo comercializados em postos de abastecimentos são a gasolina e o óleo diesel. O etanol, também muito utilizado, é um composto orgânico proveniente de fontes renováveis.

Segundo Costa (2009) os maiores problemas de contaminação em postos de combustíveis são atribuídos aos hidrocarbonetos mono aromáticos, que incluem os denominados BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos). Os BTEX, segundo Marques (2007), são os hidrocarbonetos constituintes da gasolina com maior mobilidade, podendo ser rapidamente transportados através da água subterrânea devido a sua volatilidade e solubilidade.

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) são os principais componentes presentes no diesel. Devido ao maior peso molecular, seus componentes são menos voláteis, menos solúveis em água e apresentam menor mobilidade no ambiente que os componentes da gasolina. As proporções de BTEX presentes no diesel são geralmente baixas (MARQUES, 2007). Nas contaminações envolvendo óleo diesel são encontrados naftaleno, acenaftileno, acenafteno,

fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, benzo(a)pireno, dibenzo(a,h.) antraceno, benzo(g,h,i) perileno e indeno (1,2,3-cd) pireno (FOGAÇA, 2015). A Tabela 1 apresenta algumas diferenças entre os compostos BTEX e PAH.

Tabela 1 - Comparação entre compostos BTEX e PAH

Característica	BTEX	PAH
Combustível	Gasolina	Óleo diesel
Nº átomos de Carbono	C ₄ a C ₁₂	C ₁₂ a C ₂₀
Densidade	baixa	alta
Potencial de infiltração	alto	baixo
Mobilidade	alta	baixa
Volatilidade	alta	baixa

Fonte: Souza (2016).

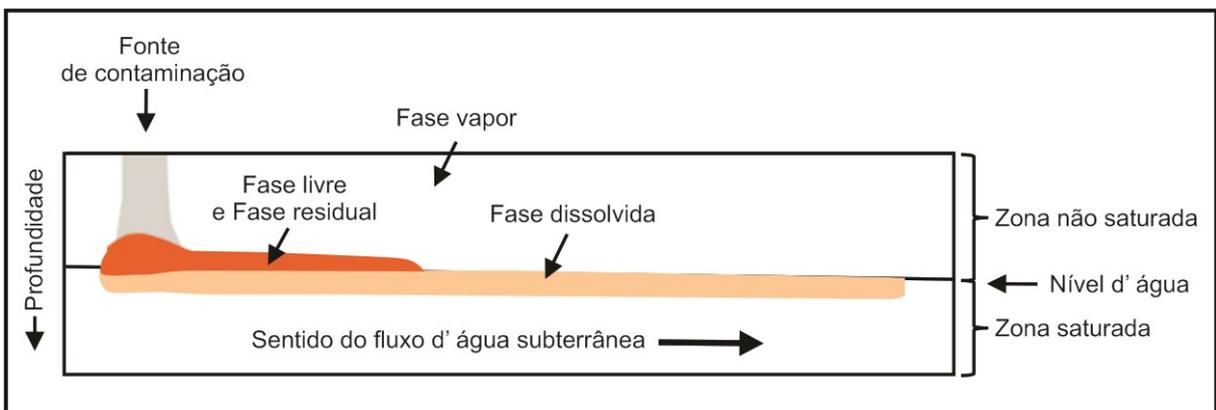
Quando ocorre um vazamento de combustível a partir de tanques de armazenamento subterrâneos, forças gravitacionais atuam direcionando o fluxo para porções profundas da subsuperfície. Os hidrocarbonetos de petróleo penetram no subsolo como líquidos em fase não aquosa NAPL (*nonaqueous phase liquids*) e são divididos nas categorias leves e densos. Os LNAPL (*light nonaqueous phase liquids*) são os formados pelos contaminantes orgânicos menos densos do que a água, com tendência a ficarem sobrenadantes quando atingem o lençol freático. Os DNAPL (*dense nonaqueous phase liquids*) são aqueles mais densos do que a água que terão a tendência de percolação até partes mais profundas do aquífero (USEPA, 1996). Gasolina e óleo diesel são classificados como LNAPL (CAVALLARI, 2017).

Segundo USEPA (1996) os hidrocarbonetos derivados de petróleo podem dividir-se em subsuperfície em uma ou mais quatro fases (Figura 1): fase de vapor (misturados com ar e vapor de água na zona não saturada), fase residual (adsorvido a partículas do solo e preso dentro dos poros, acima ou abaixo do lençol freático), fase dissolvida (diluída no solo úmido e na água subterrânea) e fase livre (presente como hidrocarboneto líquido).

Durante a flutuação sazonal do nível d' água ocorre à movimentação da fase livre LNAPL para cima e para baixo juntamente com o lençol freático. Isso faz com que ocorra o trapeamento dos LNAPL na zona saturada e na região da fase residual, ocasionando uma zona de redistribuição vertical da contaminação, denominada *smear zone* (ATEKWANA, E.; ATEKWANA, E., 2010).

A gasolina produzida no Brasil possui 27% de álcool como aditivo segundo dados da ANP (2018). A presença de etanol na gasolina pode facilitar a dissolução e aumentar a mobilidade dos compostos BTEX na água subterrânea. As concentrações de etanol na gasolina também prejudicam a decomposição natural destes compostos orgânicos, devido à sua ação inibidora do crescimento bacteriano. Assim, as plumas de contaminações no Brasil podem ser maiores e deslocarem-se mais rapidamente, além de continuarem por mais tempo do que nos países em que o etanol não é misturado à gasolina (CORSEUIL e ALVAREZ, 1996).

Figura 1 - Fases de distribuição de hidrocarbonetos em subsuperfície



Fonte: Modificado de Atekwana, E. e Atekwana, E. (2010).

Segundo Cavallari (2017) a temperatura é a propriedade físico-química que esta relacionada diretamente a redução da densidade e viscosidade do líquido contaminante. Assim, a mobilidade dos compostos em subsuperfície tende a aumentar com o acréscimo da temperatura.

Os hidrocarbonetos líquidos movem-se no mesmo sentido que as águas subterrâneas. Se o volume de hidrocarbonetos liberado em subsuperfície for pequeno em relação à capacidade de retenção do solo, os hidrocarbonetos tendem serem absorvidos às partículas do solo e toda a massa será imobilizada. Para que os hidrocarbonetos de petróleo se acumulem como produto livre no lençol freático, o volume da liberação deve ser suficiente para superar a capacidade de retenção do solo entre o ponto de liberação e o lençol freático (USEPA, 1996).

2.2 GEOFÍSICA APLICADA NA IDENTIFICAÇÃO DE PLUMAS DE CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS EM SUBSUPERFÍCIE

A utilização da geofísica na caracterização de uma área afetada por substâncias poluentes consiste, basicamente, na obtenção de informações a respeito da detecção e mapeamento da extensão da área afetada, profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo e profundidade do substrato rochoso inalterado (ELIS, 1999).

A utilização de métodos geofísicos constitui uma importante ferramenta de apoio aos estudos ambientais, representando um significativo avanço científico. Esses métodos podem ser utilizados em diversas fases como na prevenção, monitoramento e caracterização de áreas contaminadas (BRAGA *et. al.*, 2008).

A natureza não invasiva dos métodos geofísicos aliada ao baixo custo operacional, rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios, torna-os adequados para aplicação no estudo de tais problemas. A aplicação da geofísica fornece dados contínuos sobre o local estudado, reduzindo a necessidade de dados diretos, assim como permitem uma análise temporal e espacial mais detalhada (ELIS, 1999).

Dentre os métodos geofísicos, os métodos geoeletricos são aqueles que avaliam as propriedades elétricas dos materiais em subsuperfície. O método geofísico eletroresistividade analisa o parâmetro resistividade, sendo utilizado em diversos estudos de áreas contaminadas por LNAPL, devido às diferentes propriedades elétricas que ocorrem entre o substrato e os fluídos invasores.

Segundo Veloso (2016) o principal motivo para a variação da resistividade elétrica ao longo do tempo em uma área contaminada são as alterações das condições físico-químicas que ocorrem em subsuperfície. Estas alterações ocorrem devido à formação de resíduos dos processos de biodegradação.

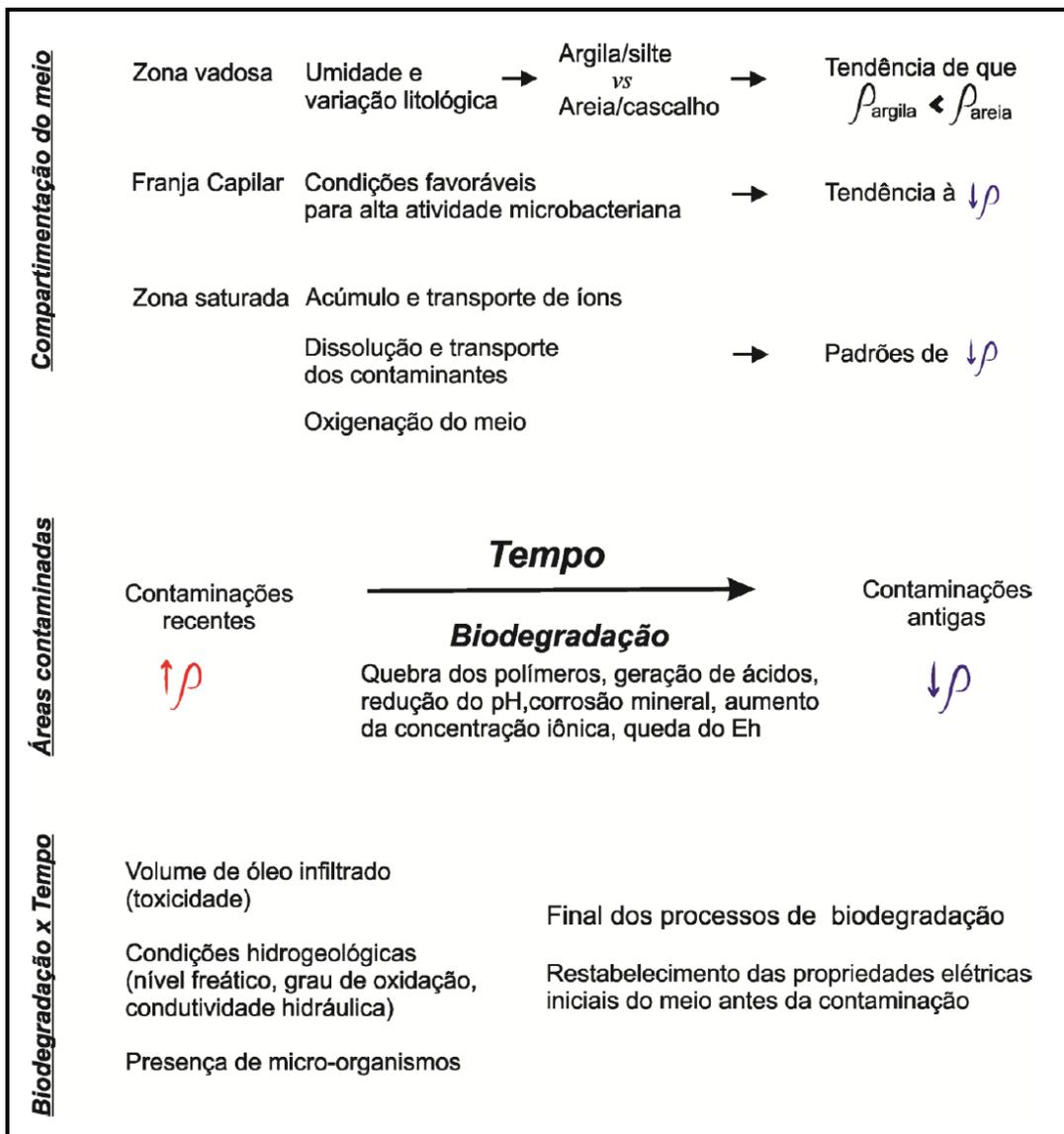
A redução do pH pela presença de ácidos orgânicos ocasiona na lixiviação dos minerais, ocorrendo o aumento da concentração de íons dissolvidos na água. Desta forma, com o efeito da dissolução dos grãos ocorre o aumento da condutividade elétrica dentro dos poros preenchidos com água, abaixo da zona de biodegradação (SAUCK, 2000).

Atekwana, E. e Atekwana, E. (2010) ressaltam que os processos de biodegradação são mais eficientes na região da franja capilar, onde a maior concentração de micro-organismos altera de maneira relativamente rápida as

propriedades físico-químicas do solo e a concentração de solutos, o que ocasiona uma redução da resistividade nesta região.

Segundo Moreira *et al.* (2006) áreas contaminadas recentemente por hidrocarbonetos apresentam alta resistividade elétrica por apresentar uma maior quantidade de hidrocarbonetos em fase livre e residual, apresentando pouca degradação do composto orgânico no ambiente. Já contaminações antigas, apresentam anomalias de baixa resistividade, pois o tempo de exposição do contaminante foi suficiente para ocorrer à biodegradação e modificasse as características do meio como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Condições que atuam na alteração da resistividade elétrica em ambientes contaminados por derivados de petróleo



Fonte: Veloso (2016).

Ortega (2006) realizou um levantamento geofísico em um centro de abastecimento de locomotivas utilizando os métodos GPR (*Ground Penetrating Radar*) e eletrorresistividade. Nas seções de GPR foram detectados pontos anômalos denominados *shadow zones* (zonas de sombra), através de sinais característicos de atenuação da onda eletromagnética. Nos perfis de eletrorresistividade essas mesmas zonas apresentaram elevada condutividade (baixa resistividade). Essas anomalias encontradas foram relacionadas à ação da biodegradação por micro-organismos do material contaminado por óleo diesel.

Utilizando modelos de resistividade e IP, Silva (2011) demonstra as influências de contaminantes no entorno de um posto de combustível. Às anomalias de baixa resistividade e baixa polarizabilidade aparentes mostraram características geométricas de plumas de contaminação. Próximo à superfície, na zona não saturada, as baixas resistividades e polarizabilidades foram associadas ao despejo de esgoto. Em profundidades maiores, na zona saturada, as resistividades ainda menores, foram associadas aos produtos da biodegradação dos LNAPLs.

Atekwana *et al.* (2000) investigaram por eletrorresistividade as propriedades elétricas de uma pluma contaminante de LNAPL após 50 anos do vazamento. A assinatura elétrica das medições de resistividade permitiu visualizar a estratigrafia em subsuperfície e a zona de contaminação associada. As medições geoelétricas registraram baixas resistividades associadas a zonas contendo a pluma de produto residual. As modificações das características geoquímicas da pluma, meio circundante e águas subterrâneas, ocorreram como resultado de reações biogeoquímicas associadas à biodegradação dos LNAPLs na subsuperfície.

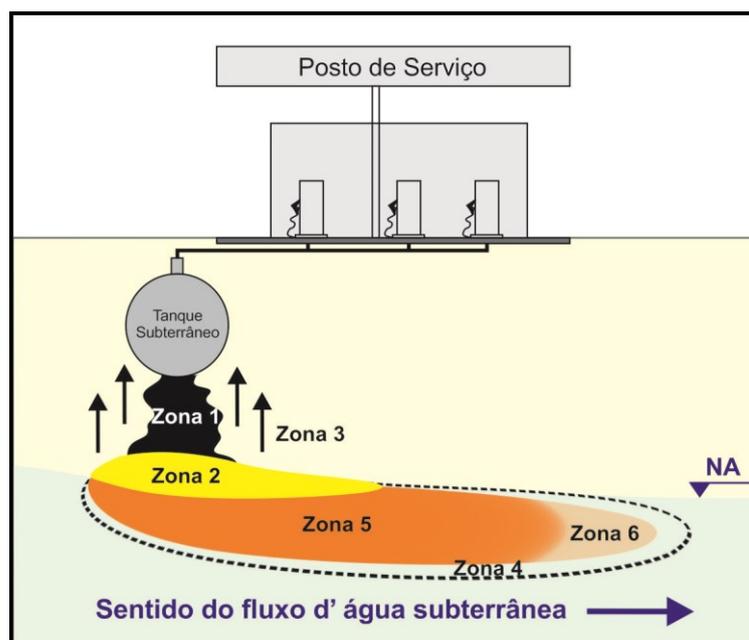
Junqueira (2017) utilizou os métodos geofísicos de eletrorresistividade e polarização induzida para identificar uma área contaminada e estabelecer um modelo de pluma de contaminação em um derramamento de 240 mil litros de óleo diesel numa linha férrea. Seções com altos valores de resistividade e cargabilidade foram associadas a um ambiente insaturado com contaminante em fase residual. Já seções com baixos valores de resistividade foram relacionadas a contaminações na fase dissolvida. O grande volume de óleo diesel derramado integra um ambiente tóxico com baixo teor de oxigênio, o que dificulta a ação de microrganismos que promovem a degradação do contaminante.

Moreira e Braga (2009) investigaram uma área industrial contaminada por benzeno, tolueno, xilenos, entre outros, através dos métodos geofísicos

eletrorresistividade e polarização induzida. Identificaram que anomalias com altos valores de resistividade são associadas a uma fase residual não degradada. Por outro lado, anomalias pouco resistivas indicam a presença de contaminante em fase dissolvida e produtos da degradação por ação de micro-organismos, em um ambiente com maior oxigenação. Os hidrocarbonetos derivados de petróleo, quando ainda não degradados, são caracterizados por valores de resistividade extremamente elevados quando presente no solo em percolação recente.

O modelo aplicado a plumas LNAPL em sedimentos arenosos, apresentado por Sauck (2000), destaca a dinâmica dos mecanismos de biodegradação e a variação da resposta geoeétrica dos contaminantes no meio geológico. O autor propõe um modelo geoeétrico condutivo de plumas de LNAPL, por meio do qual foram delimitadas 6 zonas (Figura 3), descritas abaixo:

Figura 3 - Modelo geoeétrico condutivo de pluma de LNAPL



Fonte: Modificado de Sauck (2000).

- Zona 1: localizada diretamente abaixo da fonte de vazamento, é caracterizada pela presença de produto em fase residual na zona vadosa. Ao longo do tempo, a resposta geoeétrica nesta zona passa de resistiva para condutiva.
- Zona 2: situada entre a franja capilar e o nível do lençol freático, é caracterizada pela presença de produto tanto em fase livre quanto residual. Com infiltrações de água a partir da superfície, esta zona possui condições ideais para

atividade microbiana, sendo capaz de alterar a resposta geoelétrica de resistiva para condutiva.

- Zona 3: localizada na zona vadosa, é onde ocorre a vaporização dos compostos voláteis da fase livre ou residual da zona 2. Pode ocorrer neste local um aumento da resistividade devido à evaporação desses gases pela zona vadosa.

- Zona 4: situada nos arredores da pluma dissolvida, é a zona de transição entre as condições aeróbica e anaeróbica. Embora seja uma importante fronteira geoquímica não possui influência considerável nos valores de resistividade.

- Zona 5: zona anaeróbica da pluma dissolvida, onde a presença de sólidos totais dissolvidos faz ocorrer uma diminuição da resistividade do meio.

- Zona 6: localizada na frente da pluma dissolvida em ambiente aeróbico, ocorre nesta zona um aumento da resistividade devido à precipitação de íons.

2.3 MÉTODO GEOFÍSICO ELETRORRESISTIVIDADE

Através da eletrorresistividade é possível medir a resistividade de diferentes materiais existentes no ambiente geológico. A resistividade elétrica é um parâmetro natural dos materiais que indica a maior ou menor dificuldade encontrada por uma corrente elétrica ao atravessar um determinado material (MILSON, 2003).

O parâmetro resistividade é o inverso da condutividade elétrica e depende da natureza e estado físico do material. Em solos e rochas a condutividade pode ocorrer devido à presença de minerais metálicos e grafita (condutores) em sua matriz, o que é denominado de condutividade eletrônica. A condutividade pode ocorrer também devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas, o que é denominado de condutividade eletrolítica. Neste caso, a resistividade depende de fatores como porosidade, composição mineralógica, grau de saturação, quantidade e natureza dos sais dissolvidos (ELIS, 1999).

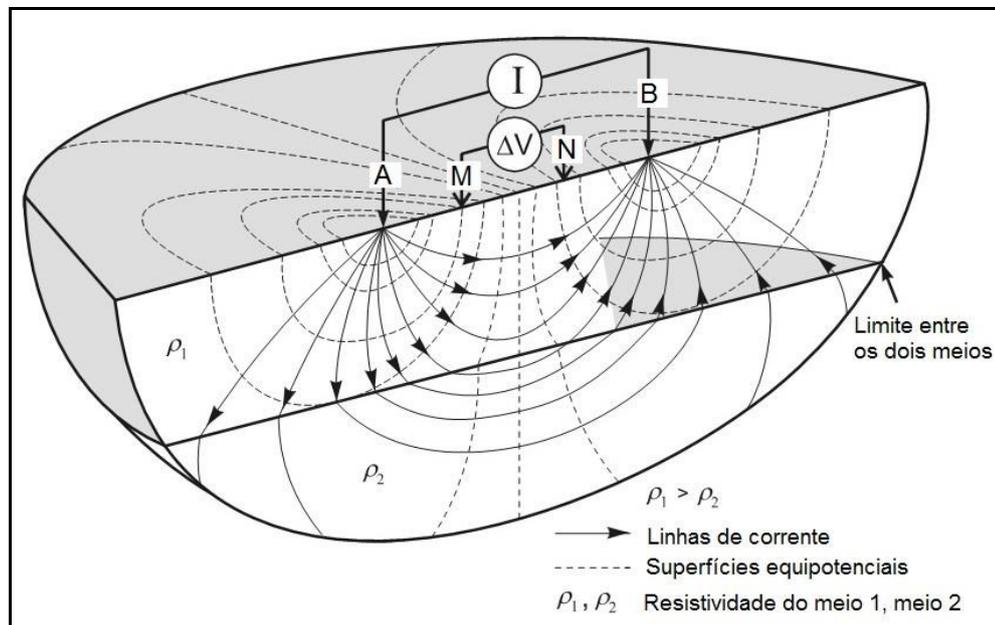
Segundo Gandolfo (2007) a maioria dos minerais não são bons condutores de corrente elétrica. Portanto, a condutividade elétrica de solos e rochas é predominantemente eletrolítica, ocorrendo através de um eletrólito (água contendo íons em solução). Segundo Elis (1999) estas condições possibilitam a aplicação da eletrorresistividade em estudos ambientais e hidrogeológicos, onde a presença de

água nos poros e, eventualmente, contaminantes ricos em sais podem ser investigados pelo método.

Entretanto, quando os solos encontram-se secos, porção localizada acima do nível freático, seus valores são considerados atípicos, apresentando uma ampla faixa de variação não identificando os materiais em subsuperfície em termos litológicos. As variações das resistividades, neste caso, refletem apenas as pequenas variações de saturação existentes (BRAGA, 2006; GANDOLFO, 2007).

O método geofísico eletrorresistividade usa fontes artificiais de corrente para produzir um campo de potencial elétrico em subsuperfície. Uma corrente elétrica (I) é introduzida no solo através de dois eletrodos de corrente (A e B), e a diferença de potencial (ΔV) gerado é medido usando outros dois eletrodos de potencial (M e N), de acordo como mostra a Figura 4. Isso permite calcular e determinar a distribuição espacial da resistividade em subsuperfície (KNÖDEL *et al.*, 2007).

Figura 4 - Princípio da aplicação do método geofísico eletrorresistividade com um arranjo de quatro eletrodos



Fonte: Knödel *et al.* (2007).

Segundo Orellana (1972) e Lowrie (2007) em uma configuração com quatro eletrodos em um meio homogêneo e isotrópico, a resistividade medida é a resistividade real. Porém em situações reais da natureza as medições de resistividade ocorrem em ambientes heterogêneos e anisotrópicos, sendo medida a

resistividade aparente (ρ_a) do meio estudado. Esta resistividade aparente não será a média nem a média ponderada, podendo acontecer que seja maior ou menor que qualquer uma delas. A Tabela 2 apresenta faixas de variações mais frequentes nos valores de resistividade para alguns tipos de sedimentos e rochas.

Tabela 2 - Valores de resistividades para alguns tipos litológicos

Tipo Litológico	Resistividade (ohm.m)
Zona não saturada	100 a 30.000
Argiloso	≤ 20
Argilo-Arenoso	20 a 40
Areno-Argiloso	40 a 60
Siltito Argiloso	10 a 60
Siltito Arenoso	
Arenoso	≥ 60
Argilito	10 a 20
Arenito	80 a 200
Basalto/Diabásio	200 a 500
Calcário	500 a 1.000
Granito/Gnaiss	3.000 a 5.000

Fonte: Modificado de Braga (2016).

As técnicas de aplicação dos ensaios em campo dentro do método de eletrorresistividade são divididas basicamente em técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e imageamento elétrico (IE). Os ensaios de SEV são aplicados quando se tem interesse em adquirir informações de resistividade em perfis verticais. Já o IE mede tanto a variação lateral como em profundidade da resistividade elétrica (LOWRIE, 2007).

Existem diversos arranjos de eletrodos dentro das técnicas de SEV e IE, dentre eles os mais utilizados são os arranjos Werner, Schlumberger e o dipolo-dipolo (BRAGA, 2016).

Para uma configuração de quatro eletrodos AB e MN o potencial elétrico pode ser calculado através da expressão:

$$\Delta V = K \cdot \frac{\rho \cdot I}{2\pi R}$$

onde a resistividade aparente pode ser medida por:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Sendo:

ρ = resistividade elétrica (ohm.m)

K = fator geométrico (m)

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N (mV)

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

O fator K depende da geometria do arranjo de eletrodos na superfície e pode ser calculado através da fórmula geral:

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

2.3.1 Imageamento elétrico

A técnica de IE, conhecida também como caminhamento elétrico, investiga ao longo das seções as variações laterais do parâmetro físico em uma ou mais profundidades, obtidas através de medidas realizadas na superfície do terreno (BRAGA, 2016). Dentre os diversos tipos de arranjos de campo disponíveis para a técnica do IE, o presente trabalho utiliza o arranjo dipolo-dipolo.

O arranjo dipolo-dipolo apresenta muitas vantagens, principalmente por ser um arranjo simétrico e apresentar praticidade operacional em campo. A aquisição dos dados de campo consiste em executar uma série de medidas mantendo-se fixo o espaçamento dos eletrodos de corrente AB e os eletrodos de potencial MN, aumentando-se a separação entre eles de acordo com o fator nx (GADOLFO, 2007).

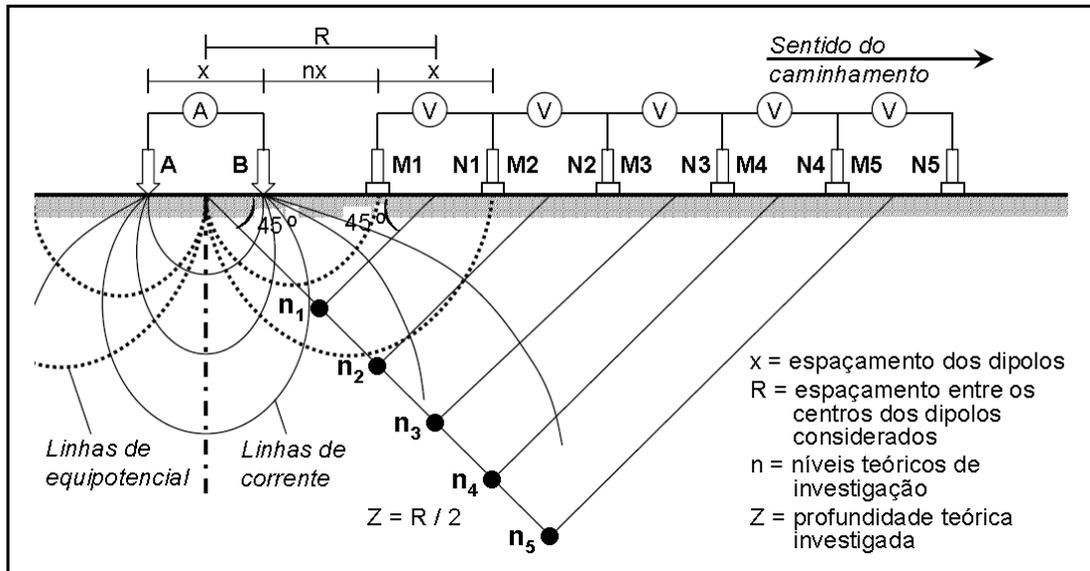
Na prática este arranjo é definido simetricamente pelos espaçamentos $X=AB=MN$. A cada afastamento entre os centros dos dipolos MN de AB corresponde a um nível de investigação em profundidade ($n= 1, 2, 3\dots$) (GALLAS, 2000). Nesse tipo de arranjo a profundidade atingida em cada nível investigado, em teoria, é a metade da distância entre os centros dos dipolos, correspondendo a $Z = R/2$ (BERTIN e LOEB, 1976), como mostra a Figura 5. Entretanto, na prática, essa relação é tomada como sendo aproximadamente $R/4$ (BRAGA, 2006).

O ponto medido é a 45° da intersecção das linhas que partem dos centros de AB e MN. A cada ponto de medida os dipolos são deslocados de uma distância igual a X, onde os dados obtidos são plotados nas posições $n= 1, 2, 3,\dots$, e interpolados gerando assim pseudo-seções de resistividade aparente (HALLOF, 1957).

O fator geométrico K para o arranjo dipolo-dipolo é dado pela equação:

$$K_{DD} = 2\pi x \frac{1}{\left(\frac{1}{n}\right) - \left(\frac{2}{n+1}\right) + \left(\frac{1}{n+2}\right)}$$

Figura 5 - Arranjo dipolo-dipolo



Fonte: Braga (2006).

2.4 GEOLOGIA REGIONAL

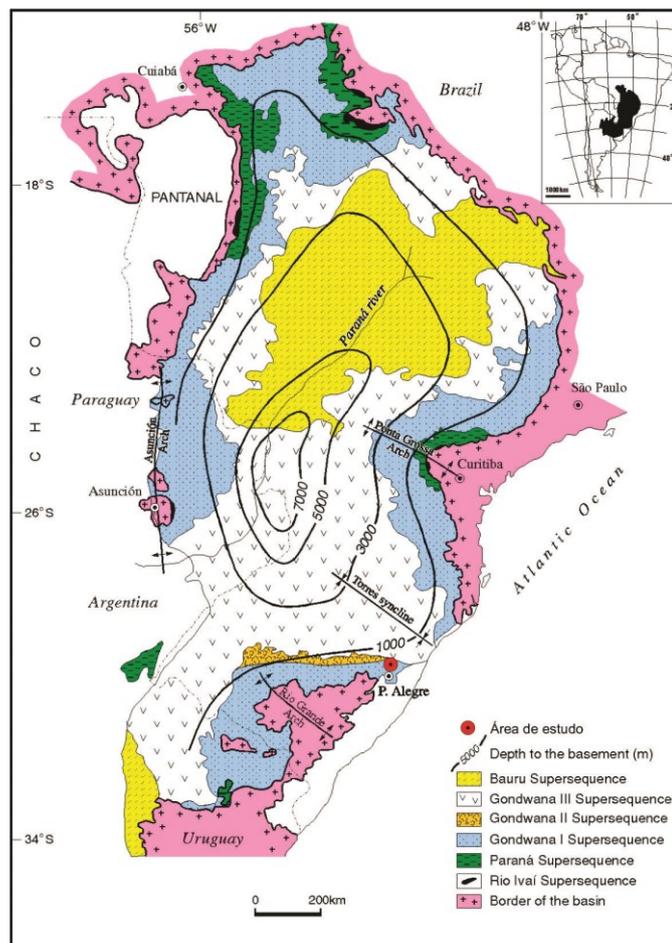
A área de estudo está inserida dentro da Bacia do Paraná. Segundo Milani (2007) a Bacia do Paraná é uma ampla região sedimentar do continente sul-americano que possui uma área em torno de 1,5 milhão de quilômetros quadrados. Inclui porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai. A bacia possui forma oval com eixo maior N-S, sendo seu contorno atual definido por limites erosivos relacionados em grande parte à história geotectônica meso-cenozóica do continente. O registro estratigráfico da Bacia do Paraná compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura máxima de aproximadamente 7.000 m.

Segundo Milani (1997) a evolução geológica da Bacia do Paraná foi diretamente influenciada pela geodinâmica da borda sul-ocidental do Gondwana. A criação de espaço deposicional, devido à subsidência da bacia, possui forte relação com os grandes episódios orogênicos que ocorreram na borda continental. Esta região foi submetida a esforços compressivos, derivados da relação de convergência

mantida entre o Gondwana e a litosfera oceânica do Panthalassa, por praticamente todo o período Fanerozóico.

A Bacia do Paraná é dividida em seis supersequências com idades que variam de 450 Ma a 65 Ma, sendo: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (Figura 6). As três primeiras supersequências são representadas por sucessões sedimentares que definem ciclos transgressivo-regressivos, relacionados a oscilações do nível relativo do mar no Paleozóico, as demais correspondem a pacotes de sedimentos continentais com rochas ígneas associadas (MILANI, 1997). O preenchimento sedimentar da bacia é predominantemente siliciclástico, sendo recoberto por um volumoso derrame de lavas basálticas (ZALÁN, 1987).

Figura 6 - Mapa geológico da Bacia do Paraná com as Supersequências Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru



Fonte: Modificado de Milani *et al.* (1998).

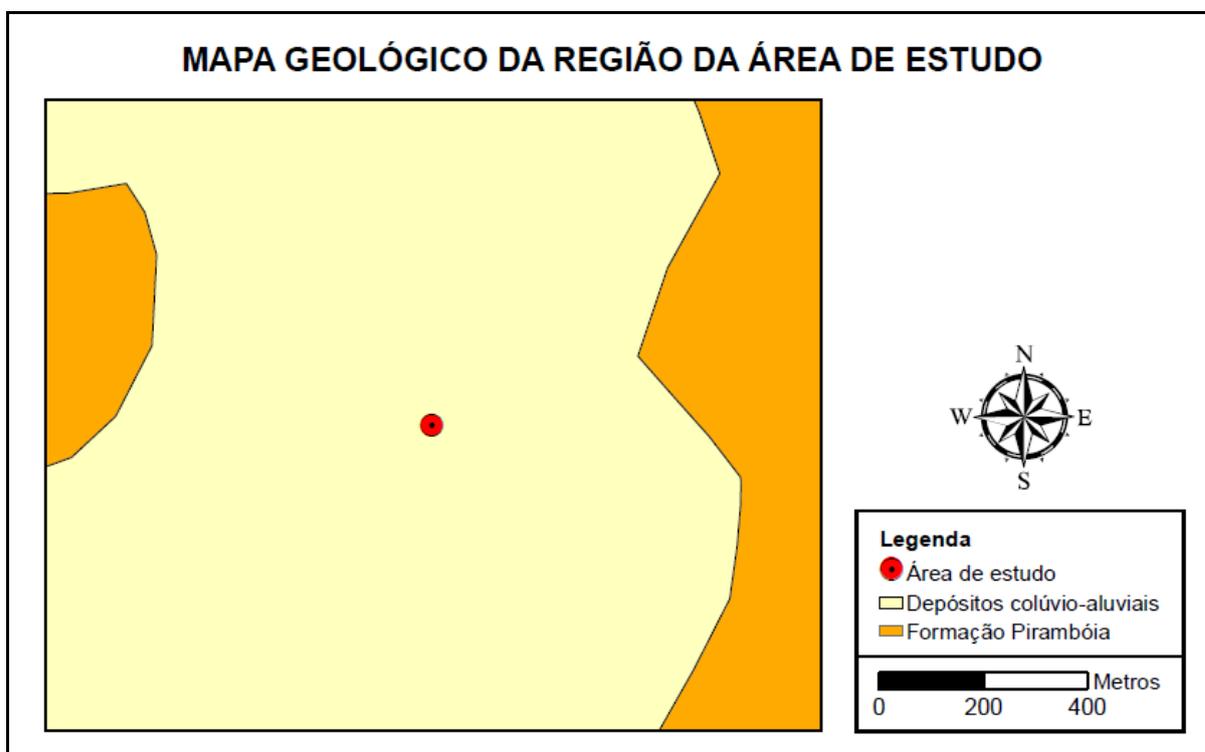
2.4.1 Geologia local

Ocorrem no entorno da área de estudo, segundo CPRM (2006), 2 unidades geológicas distintas como mostra a Figura 7, sendo elas: Formação Pirambóia e os depósitos colúvio-aluviais.

A Formação Pirambóia é constituída predominantemente por arenitos finos a grossos moderadamente selecionados, avermelhados, com estratificações cruzadas de médio a grande porte. São interpretados como depósitos de dunas eólicas que recobrem os depósitos lacustres da Formação Rio do Rasto no Eopermiano ao Eotriássico (LAVINA *et al.*, 1993).

Os depósitos colúvio-aluviais são constituídos por conglomerados, arenitos conglomeráticos, arenitos, siltitos e lamitos maciços, com laminação plano-paralela e estratificação cruzada acanalada (CPRM, 2006).

Figura 7 - Mapa Geológico com as unidades que ocorrem na região da área de estudo



Fonte: Adaptado de CPRM (2006).

2.5 HIDROGEOLOGIA

A região da área de estudo esta incluída dentro do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Segundo Machado e Faccini (2004) o SAG é conhecido como uma das maiores reservas de água doce subterrânea do mundo. Abrange uma área aproximada de 1,2 milhão de quilômetros quadrados, estendendo-se pelo Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai. Segundo Machado (2005) o SAG é composto por diversas litologias, mostrando uma grande heterogeneidade nas suas características de ocorrência, apresentando-se em uma porção aflorante e outra confinada.

O SAG refere-se a um espesso pacote de rochas arenosas depositadas na Bacia do Paraná durante o Permiano ao Cretáceo, sotopostas por quase toda sua extensão por rochas basálticas da Formação Serra Geral. Esse pacote se encontra saturado com água, e tem uma espessura que varia entre 200 a 800 m, estando situadas em profundidades que podem atingir até 1800 metros (CONICELLI, 2008).

Os estratos do Jurássico, correspondentes aos arenitos da Formação Botucatu, constituem em bons aquíferos em quase toda a bacia devido a sua menor maturidade textural, boa permeabilidade e baixa presença de argila nos poros. Já os demais estratos do Triássico de origem flúvio-lacustre/eólico, são afetados por altos níveis de argilosidade que comprometem substancialmente sua eficiência hidráulica em algumas áreas (Araújo *et al.*, 1995).

No estado do Rio Grande do Sul o SAG ocupa cerca de 55% do território do estado. É constituído por quatro grandes compartimentos, denominados Leste, Oeste, Norte-Alto Uruguai e Central-Missões (Figura 8). É composto por uma sequência de camadas sedimentares predominantemente arenosas, sendo constituído por nove Unidades Hidroestratigráficas: Botucatu, Guará, Arenito Mata, Caturrita, Alemoa, Passo das Tropas 1, Passo das Tropas 2, Sanga do Cabral e Piramboia (MACHADO, 2005).

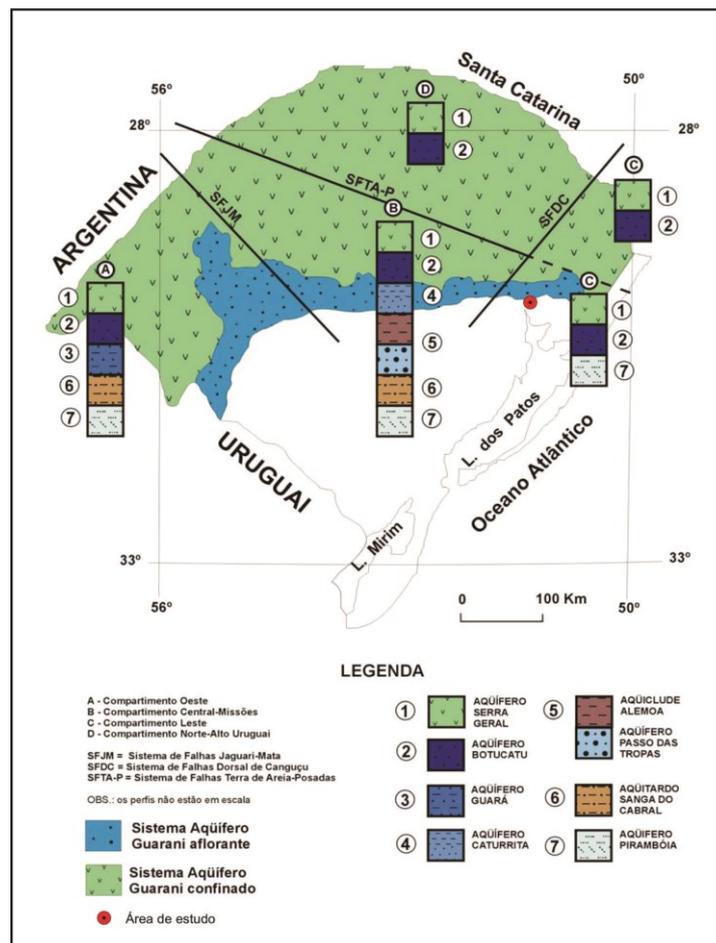
A região de Novo Hamburgo esta localizada no Compartimento Leste do SAG. Segundo Machado (2005) este compartimento do aquífero é limitado a oeste pelo Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu e a leste pela linha de costa (Figura 8). A Hidroestratigrafia do Compartimento Leste é composta predominantemente por litologias eólicas da Formação Sanga do Cabral, correlacionável com a Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia e os arenitos eólicos da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu. Apresentam espessuras do SAG que variam entre 100 e 200 m,

dependendo das espessuras das unidades hidroestratigráficas Botucatu e Pirambóia.

A espessura das rochas confinantes (Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral e sedimentos cenozóicos) varia de poucas dezenas de metros até mais de 700 m na maior parte do compartimento. As linhas de fluxo estão predominantemente direcionadas para sul e sudeste, porém não são contínuos, pois falhas podem truncar a continuidade das camadas aquíferas (MACHADO, 2005).

Na Bacia do Rio dos Sinos, segundo Kuhn (2017) o SAG ocorre sob a forma de aquíferos confinados a semiconfinados correspondentes as Formações Botucatu, Piramboia e Sanga do Cabral. Estas unidades foram afetadas por movimentação de blocos, que pode conferir caráter misto ao aquífero. Apresenta condições favoráveis à exploração de água subterrânea, com teores de sólidos totais dissolvidos de 300 mg/L e baixa vulnerabilidade.

Figura 8 - Compartimentação do SAG no Estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Machado (2005).

2.6 GEOMORFOLOGIA

O Projeto RADAM/BRASIL (1986), através de estudos bibliográficos e mapeamentos geomorfológicos na região do Estado do Rio Grande do Sul, adotou uma estrutura de compartimentação geomorfológica em três categorias distintas, sendo elas: Domínio Morfoestrutural, Regiões Geomorfológicas e Unidades Geomorfológicas. A região da área de estudo insere-se dentro da Unidade Geomorfológica Depressão Rio Jacuí (Quadro 1).

Quadro 1 – Compartimentação geomorfológica da região da área de estudo

Domínio Morfoestrutural	Região Geomorfológica	Unidade Geomorfológica
Bacias e Coberturas Sedimentares	Depressão Central Gaúcha	Depressão Rio Jacuí

Fonte: Adaptado de RADAM/BRASIL (1986).

A Unidade Geomorfológica Depressão Rio Jacuí caracteriza-se por apresentar um relevo sem grandes variações altimétricas, dominados por relevos de topo convexo conhecido por coxilhas. Ao lado das coxilhas ocorrem superfícies planas, rampeadas, recobertas por colúvios, com dissecação incipiente. Essas rampas estão localizadas geralmente ao norte da unidade entre o sopé da escarpa da Serra Geral e as coxilhas que contatam com as faixas aluvionares do Rio Jacuí. Encontram-se também áreas de relevos com topos planos (RADAM/BRASIL, 1986).

2.7 CLIMA

Segundo dados do Climate (2019) o clima na região de Novo Hamburgo é quente e temperado, existindo uma pluviosidade significativa ao longo do ano. A temperatura média é 19.4 °C e a pluviosidade média anual é 1467 mm. O mês mais seco é novembro com 106 mm e o mês com maior precipitação é setembro com 143 mm. O mês mais quente do ano é janeiro com uma temperatura média de 24.5 °C. Durante o ano a temperatura média mais baixa é em junho com 14.8 °C.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material de estudo deste trabalho é a subsuperfície de um posto de serviços. A metodologia aplicada pela investigação geofísica envolve o estudo em áreas de aterro, solo natural e água subterrânea.

3.1 LOCAÇÃO DOS PERFIS GEOFÍSICOS DE ELETORRESISTIVIDADE

Foram estipuladas na área de estudo a locação de 4 linhas com 74 m de comprimento cada uma, para a aplicação do método geofísico eletrorresistividade, por meio da técnica IE com o arranjo dipolo-dipolo (Figura 9). A linha de IE 2D-L1 esta a montante da área de estudo. Já as demais linhas 2D-L2, 2D-L3 e 2D-L4 estão à jusante da área, posicionadas 4 m distantes uma das outras. O trabalho foi realizado entre os dias 30 e 31/06/2020.

Foi definido o critério de 2 m de distância entre os eletrodos ($AB=MN=2\text{ m}$) e 16 níveis teóricos de investigação. As linhas estão dispostas paralelas ao fluxo subterrâneo visando identificar anomalias de resistividade elétrica características de contaminações por hidrocarbonetos.

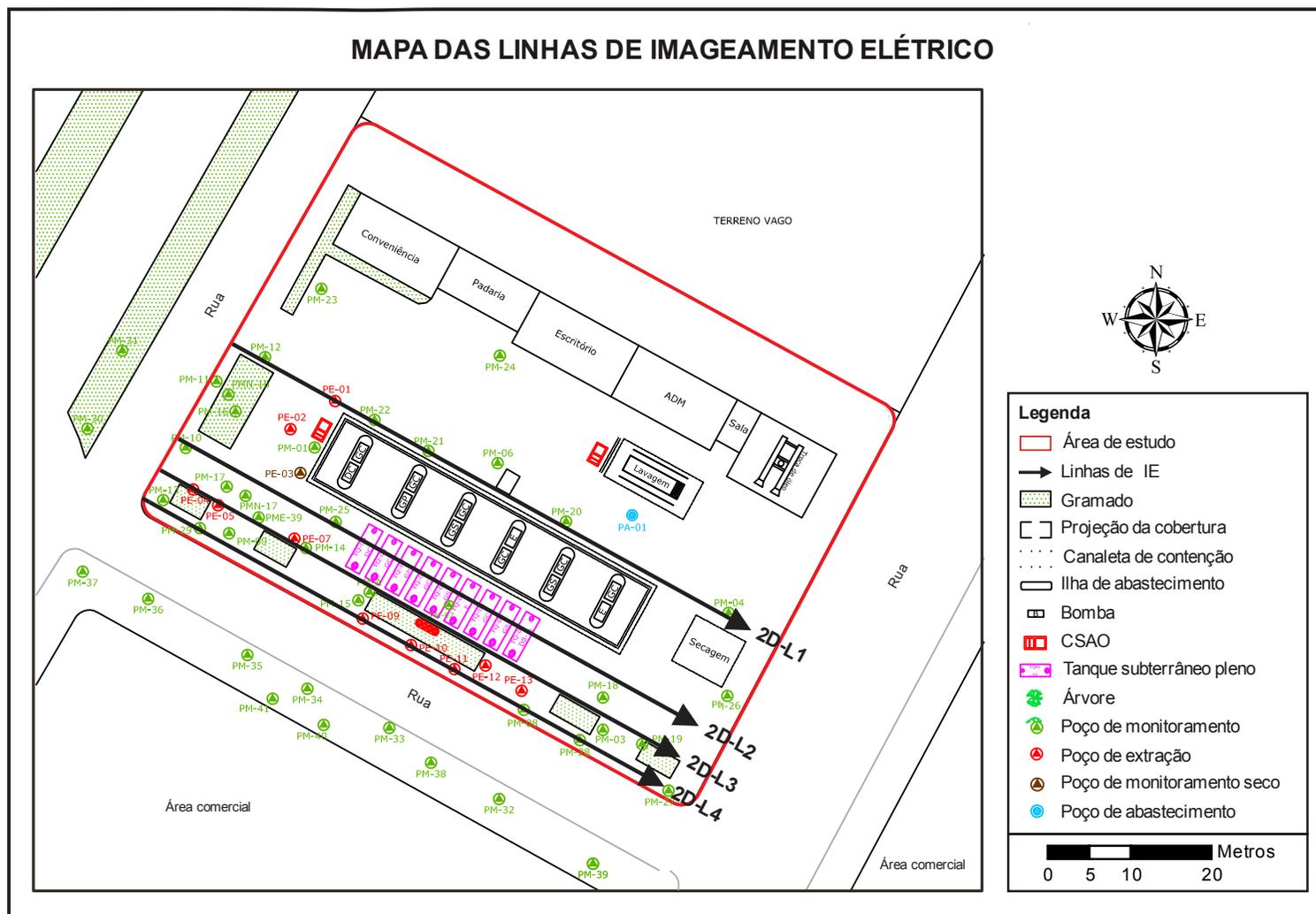
3.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para a aquisição dos dados de resistividade elétrica das 4 linhas de IE (Figura 10) foi utilizado o resistímetro EEG AL-48, fabricado pela empresa *Environmental and Engineering Geophysics* (EEG) (Figura 11). O aparelho permite realizar estudos geofísicos dos métodos eletrorresistividade e polarização induzida, transmitindo e recebendo sinais em um único módulo.

Este equipamento funciona através de um sistema de transmissão e recepção alimentado a partir de uma bateria externa de 12 V e 45 A/h, realizando leituras em 48 canais. O transmissor pode operar com máxima corrente de energização interna de 1,2 A e externa de 5 A. A tensão máxima nos eletrodos de corrente é de 500 V e a potência é 350 W. O receptor mede as tensões correlacionadas com a corrente transmitida (EEG, 2020).

Também foram utilizados para o levantamento de campo eletrodos metálicos, 2 cabos multipolares, trenas e marretas.

Figura 9 - Distribuição das 4 linhas de IE



Fonte: Modificado do Relatório de Remediação Abril/2019.

Figura 10 - Linhas de IE: A) 2D-L1; B) 2D-L2; C) 2D-L3 e D) 2D-L4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - A) Resistivímetro EEG AL-48; B) Aquisição dos dados de campo com o resistivímetro EEG AL-48



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados de resistividade aparente obtidos em campo foram processados utilizando o *software* Res2dinv 3.53 da Geotomo Software (LOKE, 2003). Este programa permite a geração de modelos de inversão bidimensional para análise qualitativa, através de dados quantitativos de campo. O produto gerado são seções 2D (distância versus profundidade) de modelos inversos de resistividade, representando a provável distribuição real dos valores de resistividade.

O Res2dinv utiliza o método inversão por suavização fazendo uso do método matemático dos mínimos quadrados (*smoothness-constrained least-square method*). Nesse método o *software* reconhece a subsuperfície terrestre como blocos retangulares, possuindo valores constantes para o parâmetro investigado. O desvio padrão RMS (*Root Mean Squared*) representa a porcentagem da média das diferenças entre cada valor do modelo e seu respectivo valor observado (LOKE e BARKER, 1996).

O programa define a largura da célula modelo como igual ao espaçamento do eletrodo da unidade. Como houve grandes variações de resistividade perto da superfície do solo, optou-se por usar um modelo com células mais estreitas. Segundo Loke (2003) isso é particularmente importante para matrizes como dipolo-dipolo, que são mais sensíveis a variações próximas da superfície. Em geral, o uso de um modelo em que a largura das células seja metade do espaçamento do eletrodo da unidade fornece melhores resultados.

Posteriormente ao processamento, os dados geofísicos foram exportados no formato x,y,z para interpolação no programa Surfer 8, visando uma apresentação de melhor qualidade dos mesmos.

3.4 REALIZAÇÃO DE SONDAGENS DE RECONHECIMENTO

Objetivando o reconhecimento dos tipos de materiais (aterros e solo) que ocorrem na subsuperfície da área, foram realizadas 3 sondagens de reconhecimento que totalizaram 7,70 m lineares perfurados. Para a locação das sondagens foi considerada a melhor abrangência da área de estudo, para uma melhor representatividade dos diferentes materiais que ocorrem em subsuperfície (Figura 12).

As 3 sondagens de reconhecimento, denominadas SD-01, SD-02 e SD-03, foram feitas com o auxílio de um trado manual de aço inox, com diâmetro de 100 mm, com hastes acopláveis por luvas dotadas de rosca (Figura 13).

Durante as perfurações ocorreu a descrição dos materiais interceptados (aterros e solo), assim como uma análise visual e olfativa da presença ou não de indícios de contaminantes em subsuperfície.

Destaca-se que foram realizadas duas outras tentativas de perfurações na área do posto, porém sem sucesso devido à interceptação da camada de aterro com

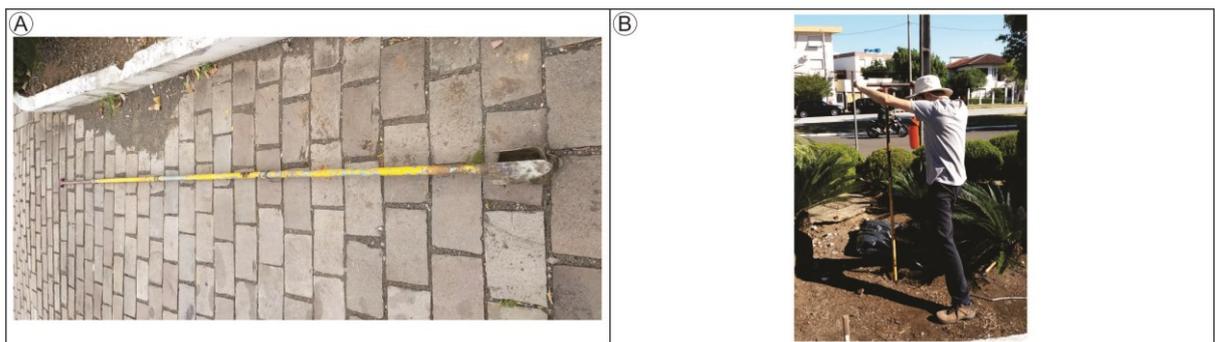
cascalho presente na área, na qual impediu o aprofundamento com o trado manual naqueles locais.

Figura 12 - Localização das sondagens SD-01, SD-02 e SD-03



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Sondagens de reconhecimento na área do posto de serviços. A) Trado manual usado para as perfurações; B) Perfuração do perfil de sondagem SD-02



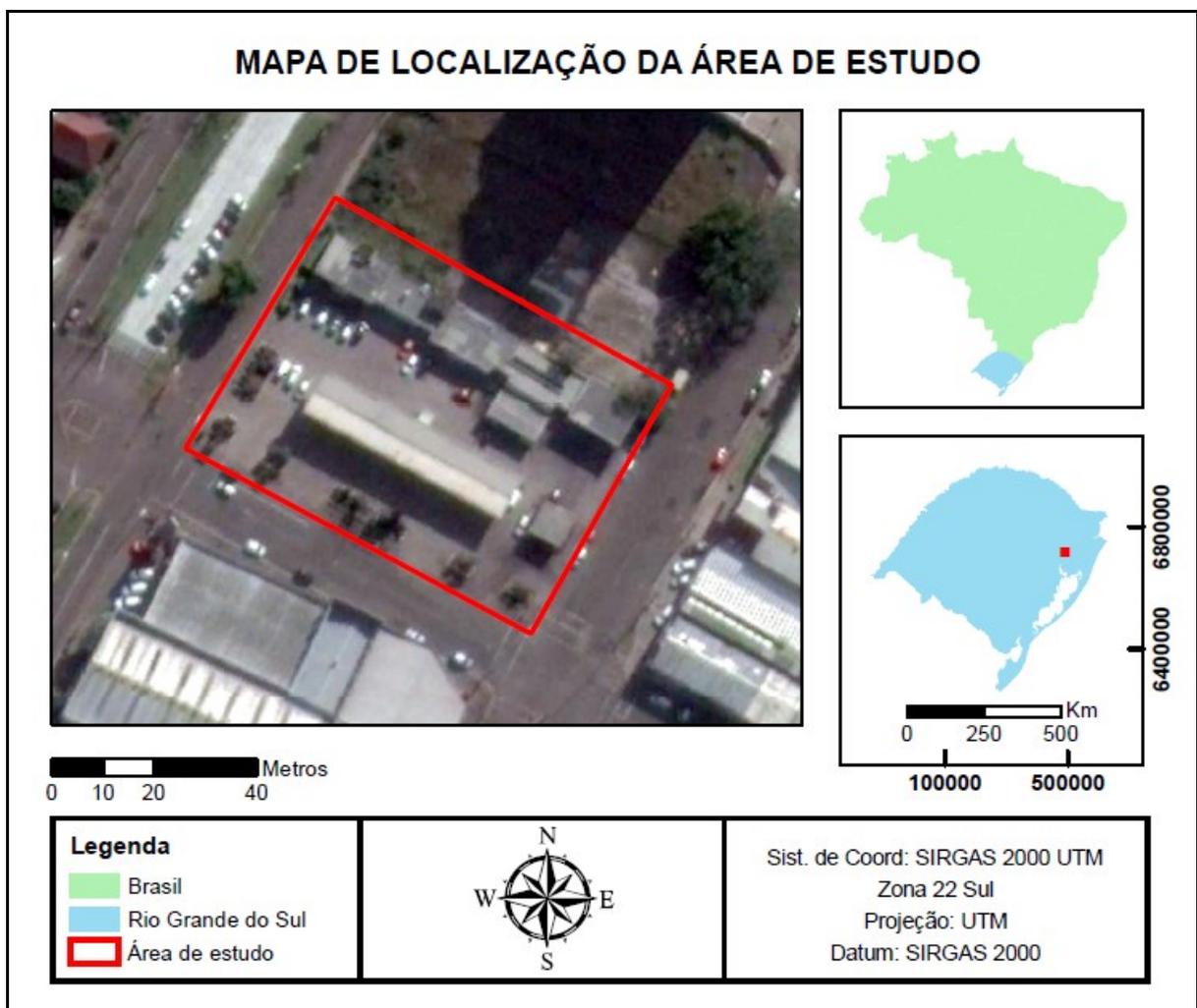
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está localizada na zona urbana do município de Novo Hamburgo, estado do Rio Grande do Sul, situado a 43 km da capital Porto Alegre (Figura 14). O entorno do empreendimento é caracterizado por uma área de densa ocupação urbana, com imóveis residenciais e comerciais.

Figura 14 - Localização da área de estudo na cidade de Novo Hamburgo



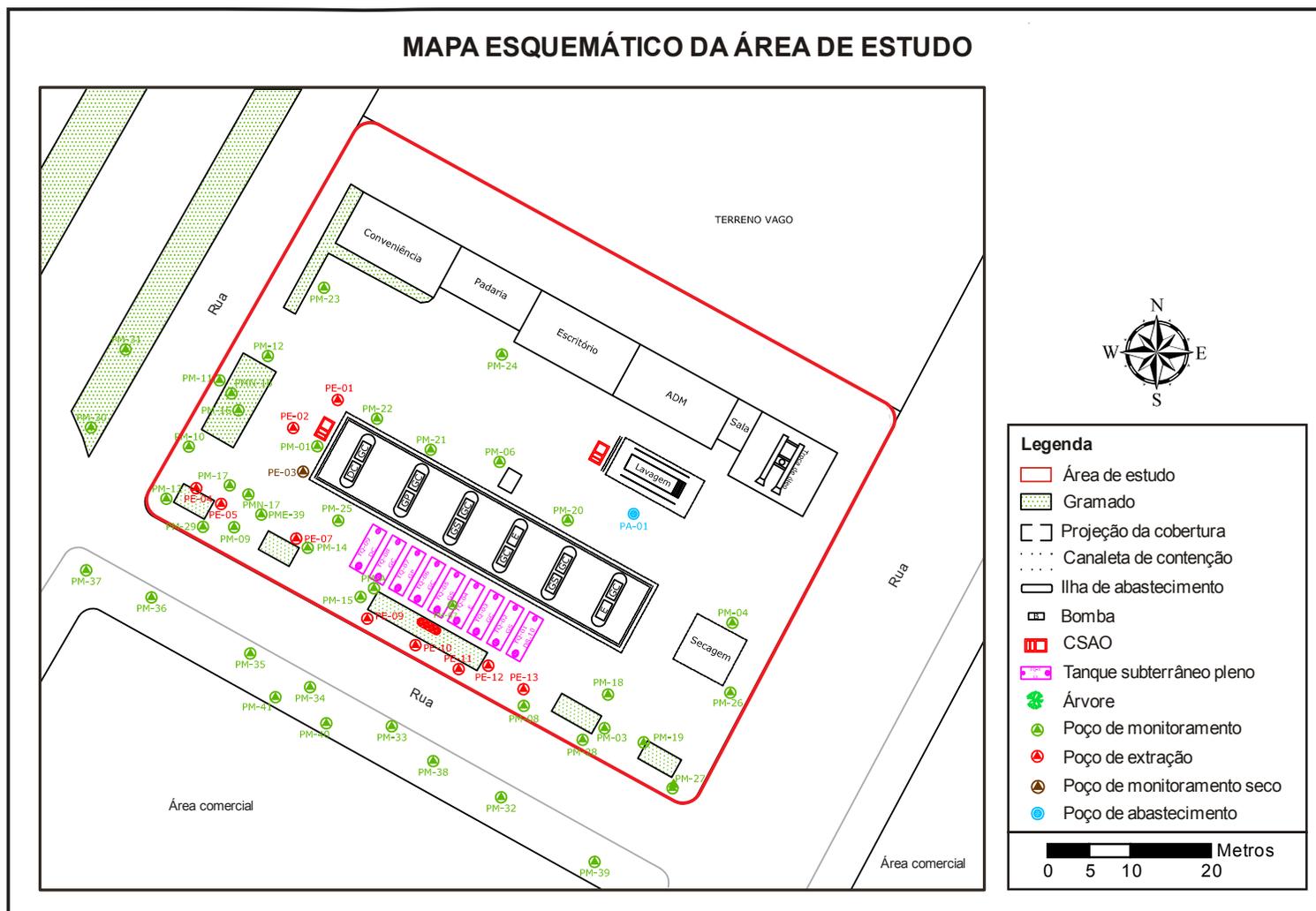
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 INFORMAÇÕES GERAIS E HISTÓRICO DO POSTO DE SERVIÇOS

Na área do posto de serviços, como mostra a Figura 15, estão dispostos 7 tanques de gasolina, 2 tanques de óleo diesel, 1 caixa separadora de água e óleo (CSAO) e 12 bombas para abastecimento. Cada tanque possui capacidade de armazenamento de 15.000 L, os quais foram todos instalados no ano de 1995.

Um breve histórico do empreendimento desde o ano de 2013 é apresentado no Quadro 2, mostrando que este local já passou por diversos trabalhos de remediação. As análises químicas de águas subterrâneas, apresentadas na Tabela 3, foram feitas no decorrer dos últimos anos em PMs e algumas delas apresentaram concentrações de BTEX, PAH e hidrocarboneto total de petróleo (TPH) acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009 e pela Lista Holandesa/2000.

Figura 15 - Mapa esquemático da área de estudo



Fonte: Relatório de Remediação Abril/2019.

Quadro 2 – Principais eventos que ocorreram no decorrer dos últimos anos na área do posto de serviços

Agosto de 2013 a fevereiro de 2014
Realizadas 4 campanhas de injeção de Percarbonato de Sódio no solo e por gravidade em PMs localizados na área do empreendimento, totalizando 17.000 L de solução aplicada, utilizando uma massa de 1.904 kg de Percarbonato de Sódio a 10 % de concentração.
Março de 2014
Elaboração de um Plano de Intervenção por meio de remediação ambiental na área dos PM-15 e PE-03. Foi restrita a utilização de água subterrânea para consumo humano até 80 m à jusante da área do empreendimento, pela alta concentração de benzeno em análises químicas ter ultrapassado os limites estabelecidos para via de ingestão humana.
Março a novembro de 2015
No decorrer desse período foram realizadas 5 campanhas de injeção de produto oxidante totalizando 55.000 L de solução e uma massa de 5.500 Kg de Percarbonato de Sódio em diversos pontos de aplicação por <i>Direct Push</i> e poços por meio de gravidade. Foram realizadas 8 sondagens de reconhecimento para instalação de 8 PMs. Em agosto de 2015 amostras de água subterrânea coletadas indicaram concentrações de Benzeno (PM-09, PM-17, PE-03, PE-04, PE-05 e PE-06) e Xilenos Totais (PE-05 e PE-06) superiores aos valores de investigação da Resolução CONAMA 420/2009 e de TPH Total (PM-09 e PE-06) superiores aos valores de intervenção estabelecidos pela DD CETESB 10/2006.
Julho de 2016
Campanha de aplicação de produto oxidante utilizando 11.750 L de solução e uma massa de 1.175 kg de Persulfato de Sódio, Percarbonato de Sódio e produto ativador em 7 pontos por <i>Direct Push</i> e em 7 PMs.
Novembro de 2016
Análises laboratoriais em amostras de água subterrânea coletadas indicaram concentrações de Benzeno (PM-01, PM-03, PM-07, PM-08, PM-14, PM-19, PM-35, PE-05, PE-06, PE-07 e PE-12), Tolueno (PE-05 e PE-06), Etilbenzeno (PE-05 e PE-06) e Xilenos Totais (PM-01, PM-16, PE-05, PE-06 e PE-07) acima dos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009.
Janeiro de 2017
Remoção de solo contaminado, identificando indícios de contaminação por derivados de petróleo. Amostras coletadas de solo removido apresentaram leituras de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) máxima de 11.000 ppm, sendo superior ao valor de referência de 500 ppm estabelecido para classificação como Resíduo Classe 1.
Fevereiro de 2017
Realização de 2 sondagens para instalação de 2 PMs para delimitar uma pluma de benzeno em fase dissolvida. Coletas de amostras de água subterrânea indicaram concentrações de Benzeno (PM-38), Tolueno (PM-38), Etilbenzeno (PM-28 e PM-

39), Xilenos Totais (PM-28, PM-38 e PM-39) e Naftaleno (PM-28) superiores aos valores de investigação estabelecidos pela resolução CONAMA 420/2009.

Abril de 2018

Análises de água subterrânea indicaram concentrações de Benzeno (PM-01, PM-03, PM-05, PM-07, PM-09, PM-13, PM-14, PM-17, PM-19, PM-28, PM-29, PM-34 e PME-39), Tolueno (PM-13, PM-29 e PME-39) Etilbenzeno (PM-01, PM-13, PM-28, PM-29 e PME-39), Xilenos Totais (PM-01, PM-09, PM-13, PM-28, PM-29 e PME-39) e Naftaleno (PM-01, PM-13, PM-28 e PME-39) superiores aos valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009 e concentrações de TPH Total (PM-01, PM-05, PM-07, PM-08, PM-09, PM-10, PM-13, PM-14, PM-19, PM-24, PM-25, PM-28, PM-29, PM-34 e PME-39) superiores aos valores de intervenção estabelecidos pela DD CETESB 10/2006. No decorrer, foi realizada uma campanha de aplicação de agentes oxidantes utilizando 9.500 L de solução e uma massa de 950 kg de Persulfato de Sódio, Percarbonato de Sódio e produto ativador em 3 pontos de aplicação por *Direct Push* e 4 poços por meio de gravidade.

Julho de 2018 a dezembro de 2018

Foram aplicados 4.200 L de solução de produto oxidante e liberador gradativo de oxigênio em cada uma das duas campanhas realizadas neste período. Quanto à Resolução CONAMA n° 420/2009 foram identificadas concentrações de Benzeno nos PM-07, PM-14 e PM-19, de Etilbenzeno no PM-28 e Xilenos Totais no PM-28. Os resultados analíticos de TPH Total indicaram concentração superior ao valor orientador da Lista Holandesa/2000 no poço PM-28.

Fonte: Relatório de Remediação Abril/2019.

Tabela 3 - Dados de concentração dos compostos BTEX, PAH e TPH em análises químicas de águas subterrâneas em PMs na área do posto de serviços. Os resultados em vermelho representam concentrações acima dos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 420/2009 (*) e Lista Holandesa 2000 (**)

PM	PM-07			PM-09			PM-13			Referência
Profundidade (m)	3,47			3,70			3,00			
Mês	Jan/2018	Jul/2018	Mar/2019	Jan/2018	Jul/2018	Mar/2019	Jan/2018	Jul/2018	Mar/2019	
Benzeno	854	1763	Não amostrado	88	< 1	< 1	429	< 1	< 1	5*
Tolueno	68	411		651	< 1	< 1	3947	< 1	42	700*
Etilbenzeno	129	121		73	< 1	< 1	822	< 1	850	300*
Xilenos Totais	223	97		660	< 3	< 3	2646	< 3	2225	500*
Naftaleno	2,27	0,4		16,05	< 0,01	< 0,01	233,3	< 0,01	1,52	140*
TPH Total	1098	< 145		1046	< 145	< 145	11217	< 145	881	600**
PM	PMN-17			PM-18			PM-21			Referência
Profundidade (m)	3,92			3,75			3,16			
Mês	Jan/2018	Jul/2018	Mar/2019	Jan/2018	Jul/2018	Mar/2019	Jan/2018	Jul/2018	Mar/2019	
Benzeno	Não amostrado	Não amostrado	100	< 2	Não amostrado	< 1	Não amostrado	Não amostrado	< 1	5*
Tolueno			< 1	nd		< 1			700*	
Etilbenzeno			219	4		< 1			300*	
Xilenos Totais			< 3	nd		< 3			500*	
Naftaleno			62	2,1		< 0,01			140*	
TPH Total			1047	299		< 145			600**	
PM			PM-28			PME-39			Referência	
Profundidade (m)	3,78			3,69						
Mês	Jan/2018	Jul/2018	Mar/2019	Jan/2018	Jul/2018	Mar/2019				
Benzeno	11	< 1	< 1	70	< 1	< 1	5*			
Tolueno	38	22	< 1	1423	< 1	< 1	700*			
Etilbenzeno	1057	1073	< 1	574	< 1	< 1	300*			
Xilenos Totais	2747	1986	< 3	2787	< 3	< 3	500*			
Naftaleno	331,12	53,02	< 0,01	229,7	< 0,01	< 0,01	140*			
TPH Total	11220	1630	< 145	10041	< 145	< 145	600**			

Fonte: Relatório de Remediação Abril/2019.

4.3 SUBSUPERFÍCIE DA ÁREA DE ESTUDO

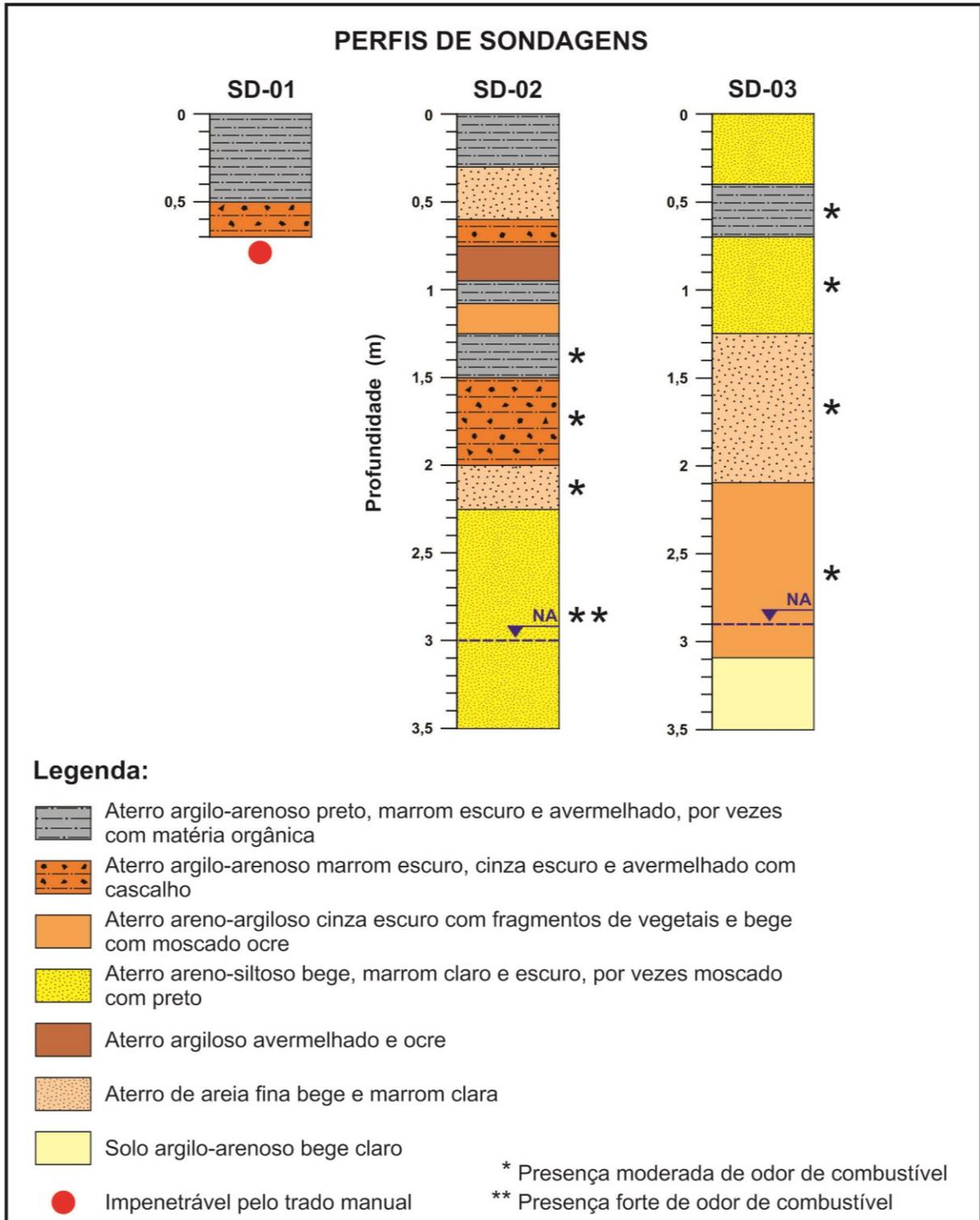
4.3.1 Aterros e solo

A subsuperfície da área de estudo é caracterizada por uma grande heterogeneidade de materiais que correspondem a níveis contendo aterros e solo. Os perfis de sondagem SD-01, SD-02 e SD-03 permitem identificar os seguintes materiais que ocorrem na subsuperfície do posto de serviços:

- Aterro argilo-arenoso;
- Aterro areno-argiloso;
- Aterro areno-siltoso;
- Aterro de areia fina;
- Aterro argiloso;
- Solo argilo-arenoso.

A Figura 16 mostra os perfis esquemáticos das sondagens de reconhecimento com a descrição detalhada dos materiais encontrados e a Figura 17 apresenta os registros fotográficos mais significativos.

Figura 16 - Perfis de sondagem SD-01, SD-02 e SD-03



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - A) Aterro argilo-arenoso; B) Aterro areno-siltoso; C) Aterro de areia fina; D) Aterro areno-argiloso; E) Aterro argiloso; F) Solo argilo-arenoso



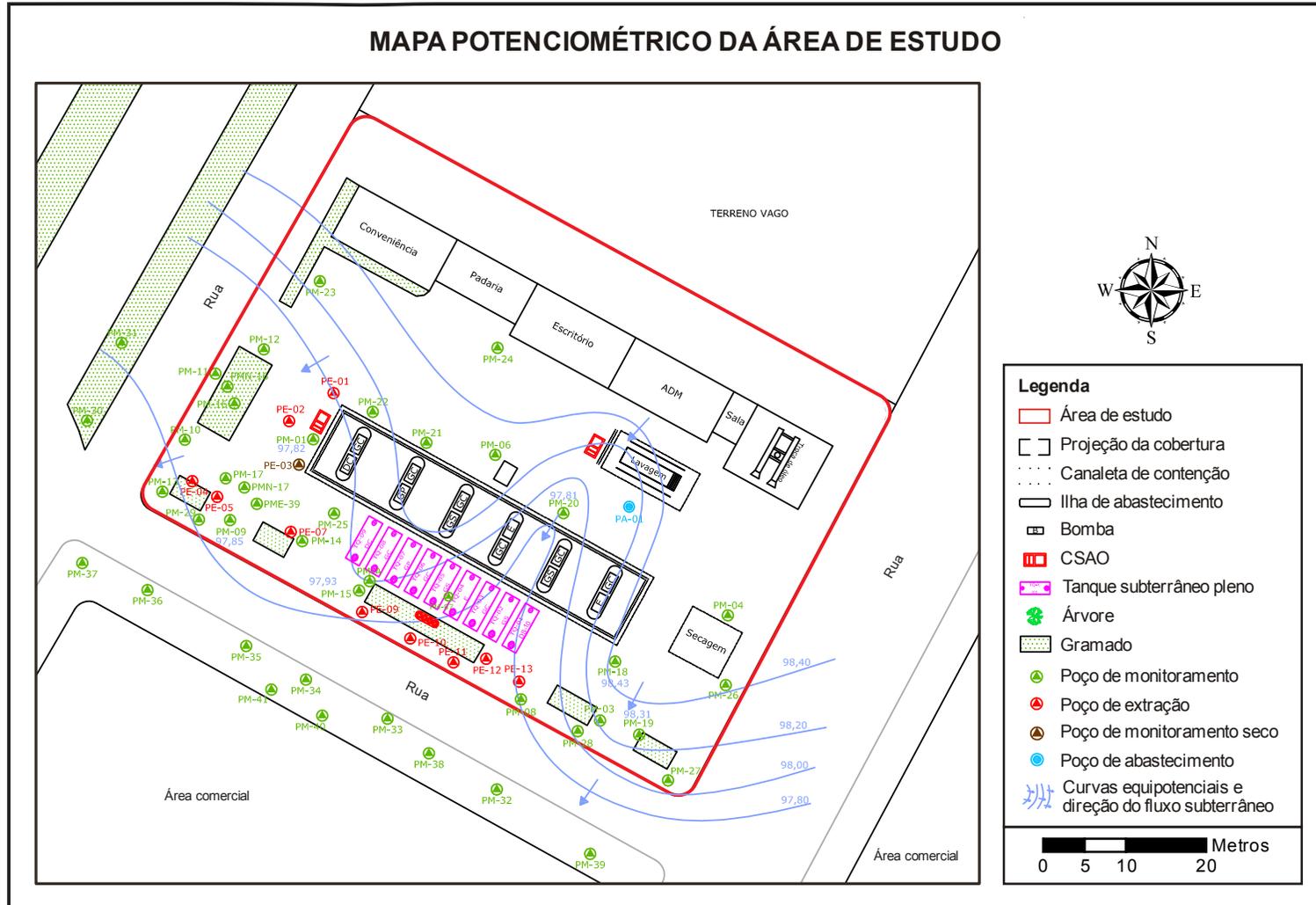
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Águas subterrâneas

O mapa potenciométrico da área do posto de serviços, retirado do último relatório de remediação, revela um sentido preferencial do fluxo d' água subterrânea para SW, o qual acompanha o caimento topográfico do terreno (Figura 18).

A Tabela 4 mostra a profundidade do nível d' água medida na boca de alguns PMs no segundo dia de aquisição dos dados geofísicos. O nível do lençol freático interceptado apresentou profundidades variando de 1,50 a 3,10 m.

Figura 18 - Mapa potenciométrico da área do posto de serviços



Fonte: Relatório de Remediação Abril/2019.

Tabela 4 - Profundidades do nível d' água em alguns PMs coletadas em 31/06/2020

PM	Prof (m)	N.A (m)	PM	Prof (m)	N.A (m)	PM	Prof (m)	N.A (m)
PM-01	3,47	3,00	PMN-17	–	2,85	PM-28	3,78	3,00
PM-03	3,34	1,50	PM-18	3,75	2,85	PM-29	1,93	seco
PM-08	3,12	2,90	PM-19	3,82	1,80	PME-39	3,69	2,85
PM-09	3,70	2,60	PM-20	3,92	3,00	PE-07	–	2,95
PM-13	3,00	2,80	PM-21	3,16	3,10	PE-12	1,50	seco
PM-14	2,67	seco	PM-25	3,70	3,10	PE-13	2,43	seco

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As interpretações das seções modeladas de IE foram feitas a partir das imagens geradas, correlacionadas com análises químicas de águas subterrâneas em PMs, sondagem de reconhecimento e na ampla bibliografia pesquisada sobre áreas contaminadas por LNAPL. As pseudo-seções de resistividade aparente medidas, calculadas, juntamente com as seções modeladas de IE, são apresentadas nos Apêndices A, B, C e D.

É utilizado como base conceitual o modelo geoeletrico condutivo de pluma de LNAPL desenvolvido por Sauck (2000), apresentado na Figura 3. Este modelo associa baixos valores de resistividade à presença de compostos orgânicos em diferentes zonas de uma pluma de contaminação.

Os valores menores que 20 ohm.m foram definidos para delimitar anomalias condutivas atribuídas a áreas com concentrações de LNAPL em diferentes fases.

Os valores de resistividade concedidos para os materiais litológicos presentes nas 4 seções de IE são relacionados com os parâmetros propostos por Braga (2016). Este autor apresenta faixas de variações mais frequentes nos valores de resistividade para alguns tipos de sedimentos e rochas (Tabela 2).

5.1 IMAGEAMENTO ELÉTRICO 2D-L1

A seção de imageamento 2D-L1 (Figura 19) apresenta padrões geoeletricos que permitem identificar e diferenciar distintos comportamentos relacionados aos contrastes de resistividades. Ocorrem nítidas zonas com alta condutividade (< 20 ohm.m) que foram designadas de anomalias 1 a 4.

As anomalias 1 e 2 são de maior dimensão, entre as distâncias de 19 a 39 m (anomalia 1) e 44 a 60 m (anomalia 2), atingindo a profundidade de 2 a 10 m. Já as anomalias 3 e 4 são mais rasas (profundidade máxima de 3 m) e pontuais, entre a distância 23 a 27 m (anomalia 3) e 37 a 41 m (anomalia 4).

Valores de resistividades acima de 60 ohm.m são observados, mais frequentemente, entre os intervalos de 0 a 27 m e 61 a 72 m do caminhamento, bem como também nas adjacências das anomalias de alta condutividade.

As anomalias 1 e 2 são vinculadas a fase residual e dissolvida da contaminação gerada pela área da lavagem de veículos, localizada a montante do

local onde foi realizado o imageamento 2D-L1. Após infiltrarem em subsuperfície, esses efluentes ricos em resíduos de graxas e combustíveis atingem o aquífero freático, migrando para porções a jusante da área de estudo no sentido do fluxo d' água subterrânea.

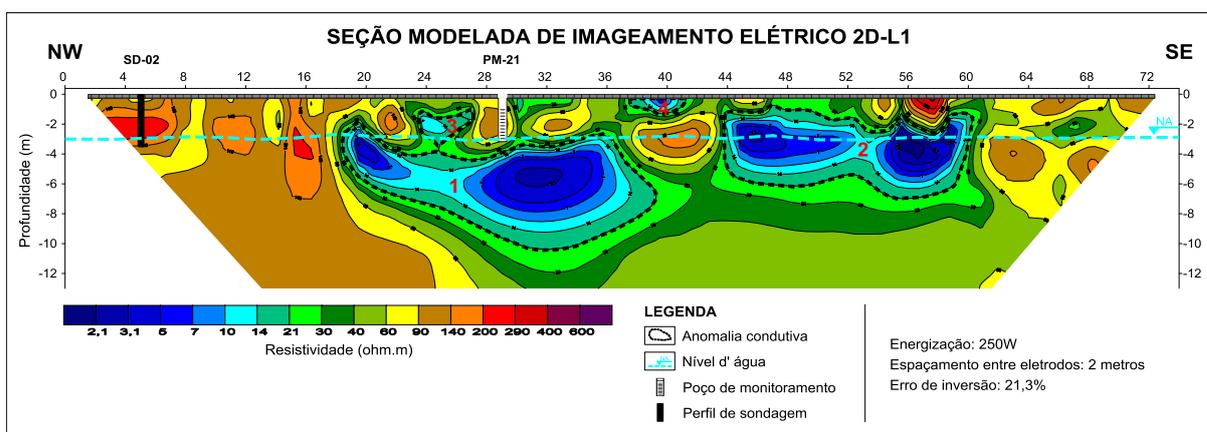
Já as anomalias 3 e 4, por serem mais superficiais e pontuais, são associadas à biodegradação da fase residual de contaminações a partir de pontos isolados da superfície.

Os valores de resistividade entre 20 e 60 ohm.m também são associados a contaminações por derivados de petróleo (em menor concentração), caracterizando a presença de contaminantes em fase residual quando na zona vadosa, e em fase dissolvida quando na zona saturada.

Já os valores de resistividade acima de 60 ohm.m, vistos desde o início da seção até os 27 m de distância, bem como também nas adjacências das áreas anômalas, foram associados à assinatura geológica indicativa de ausência de contaminação em materiais arenosos, como interceptados do perfil de sondagem SD-02.

O fato do PM-21 não apresentar concentrações de compostos orgânicos na última campanha de análises químicas pode ser em razão do deslocamento sazonal da pluma de contaminação ou, também, devido à anomalia 1 estar a uma profundidade superior ao fundo do poço.

Figura 19 - Seção Modelada de Imageamento Elétrico 2D-L1



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 IMAGEAMENTO ELÉTRICO 2D-L2

A seção de imageamento 2D-L2 (Figura 20) apresenta 4 focos de anomalias associadas a baixos valores de resistividade (< 20 ohm.m), denominadas de anomalias 5 a 8. A anomalia 7 está localizada ao longo de uma grande extensão do perfil geoeletrico entre as distâncias de 25 a 56 m, em profundidades de 3 a 8 m. As demais anomalias 5, 6 e 8 estão posicionadas entre as distâncias de 9 a 11 m, 17 a 23 m e 61 a 63 m, respectivamente, em profundidades que variam entre 3 a 8 m.

Os valores maiores que 60 ohm.m são bem evidentes ao longo de toda extensão do perfil geoeletrico em porções mais superficiais, assim como também da metade para a base da seção.

A anomalia 7, quando nas proximidades do nível freático, é interpretada como sendo o produto da fase residual da pluma de LNAPL em elevado estágio de biodegradação. Já à medida que os contaminantes avançam em profundidade na zona saturada passam a ocorrer na fase dissolvida. Os indícios de contaminação neste local são corroborados com a alta concentração de benzeno e TPH em análises químicas do PM-07.

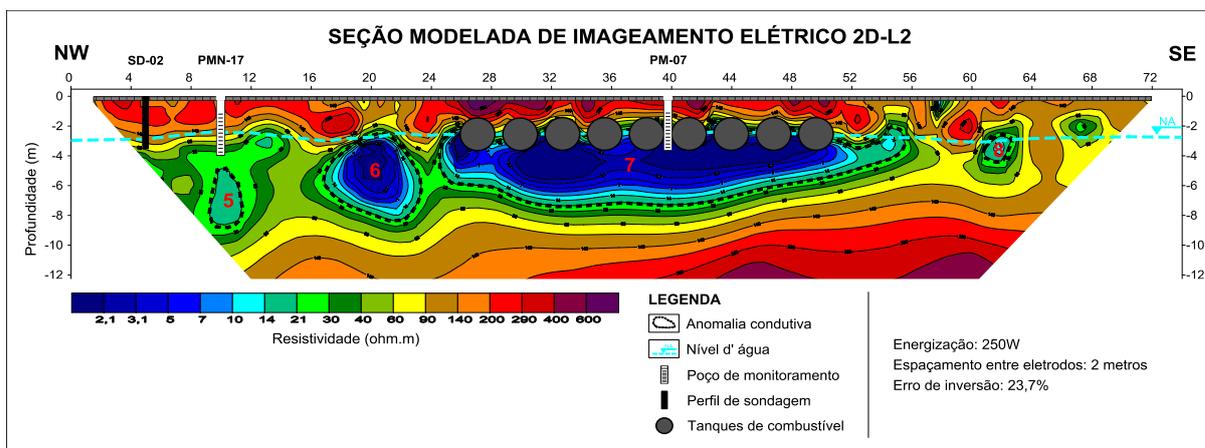
As anomalias 5, 6 e 8 são associadas à fase dissolvida de LNAPL pela migração da pluma de contaminação, seguindo o sentido do fluxo d' água subterrânea, de acordo como mostra o mapa potenciométrico da área de estudo (Figura 18). Ressalta-se que já foram detectadas altas concentrações de benzeno e TPH no PMN-17, bem como também a presença de forte odor de combustível em sedimentos do perfil de sondagem SD-02, localizado próximo à anomalia 5.

Com relação aos valores de resistividades entre 20 e 60 ohm.m, também refletem em área impactada, porém com menor concentração de compostos orgânicos que envolvem a área mais contaminada.

Os valores de resistividade acima de 60 ohm.m estão associados à ocorrência de fácies arenosas e/ou aterro na zona não saturada e arenosas na zona saturada, como identificado no perfil de sondagem SD-02.

Os valores de resistividade mais altos encontrados próximos à superfície (> 140 ohm.m) indicam porções de solo e/ou aterro mais secas, na qual marca muito bem a passagem da zona não saturada para a saturada, sendo possível à correlação com as medidas de nível d' água nos PMs (Tabela 4).

Figura 20 - Seção Modelada de Imageamento Elétrico 2D-L2



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 IMAGEAMENTO ELÉTRICO 2D-L3

Na seção de imageamento 2D-L3 (Figura 21) foram observados duas zonas com anomalias condutivas (< 20 ohm.m), reconhecidas como anomalias 9 e 10. A anomalia 9 possui maior dimensão e atinge níveis mais profundos (entre 2 e 10 m de profundidade), localizada desde o limite que ultrapassa o início da seção a NW até os 48 m de distância. A anomalia 10, por sua vez com menor tamanho e mais rasa (2 a 7 m de profundidade), esta situada entre 49 e 57 m de distância.

A anomalia 9, quando em porções mais próximas ao nível freático, é associada à fase residual de LNAPL em elevado estágio de biodegradação, passando para a fase dissolvida à medida que ocorre um acréscimo em profundidade e avanço no sentido do fluxo d' água subterrânea. Já a anomalia 10, é caracterizada pela presença de hidrocarbonetos de petróleo em fase dissolvida. Ressalta-se que já foram observadas altas concentrações de compostos orgânicos em análises químicas realizadas no PM-07, PMN-17 e PME-39, mostrando evidências de contaminação nestes locais. O fato do PME-39 não apresentar indícios da presença de contaminantes em suas últimas análises químicas de água pode ser devido ao deslocamento sazonal da pluma contaminante e/ou, também, devido aos trabalhos de remediação realizados no local.

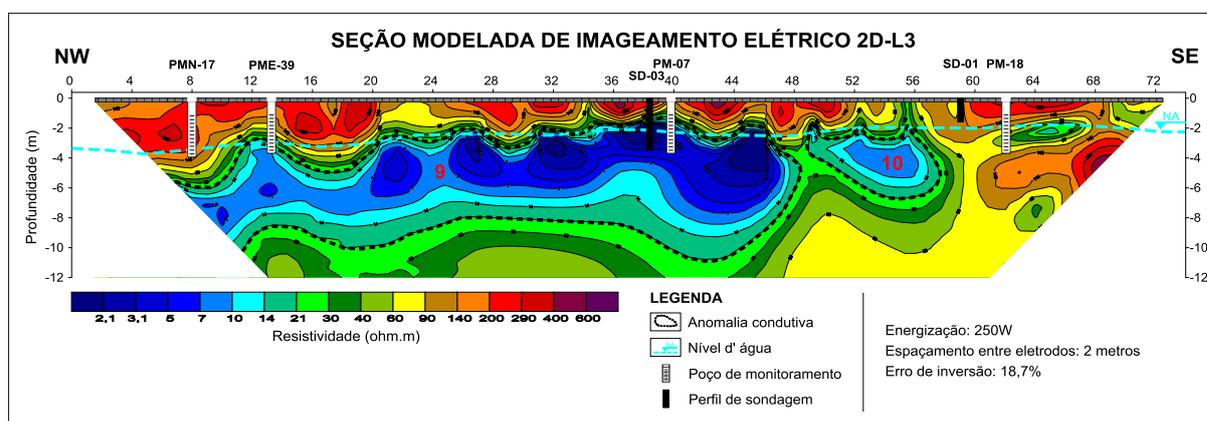
Os valores de resistividade entre o intervalo de 20 e 60 ohm.m são descritos como o resultado de uma fase dissolvida de LNAPL que envolve as anomalias de mais baixa resistividade, onde se encontra a área com maior incidência de contaminação.

É possível correlacionar às análises químicas do PM-18, localizado na distância de 62 m da seção, com os resultados de resistividade obtidos, na qual ambos não mostram indícios de contaminação nestas adjacências da área.

Os valores acima de 60 ohm.m são atribuídos à fácies arenosas e/ou aterro presentes na zona vadosa e arenosas na zona saturada, como interceptados no perfil de sondagem SD-03.

Em relação aos valores mais altos de resistividade acima de 140 ohm.m que ocorrem próximos à superfície, é possível mostrar claramente a passagem da zona não saturada para a saturada, podendo ser feita uma associação com as medidas diretas de nível d' água (Tabela 4).

Figura 21 - Seção Modelada de Imageamento Elétrico 2D-L3



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 IMAGEAMENTO ELÉTRICO 2D-L4

Na seção de imageamento 2D-L4 (Figura 22) observam-se 2 focos com anomalias condutivas (< 20 ohm.m), identificadas como anomalias 11 e 12. A anomalia 11 esta localizada desde o limite que ultrapassa o início da seção a NW até os 27 m de distância, em profundidades que variam desde os 4 m até a base da seção geoeletrica. Já a anomalia 12, situada na parte central do imageamento, esta posicionada entre a distância de 32 a 41 m, na profundidade de 4 a 11 m.

Os valores de resistividade entre 20 e 60 ohm.m podem ser observados ao longo de toda a seção a partir dos 3 m de profundidade até a base do perfil geoeletrico. Valores acima de 60 ohm.m ocorrem desde a superfície até profundidades entre 3 e 7 m.

As anomalias 11 e 12 sugerem contaminação do meio pela migração da pluma de contaminação em fase dissolvida observada nos imageamentos 2D-L2 e 2D-L3, que se encontram imediatamente a montante. Os PM-09 e PM-13, localizados acima da anomalia 11, já acusaram elevadas concentrações de BTEX e TPH neste local. É relatada também a presença de odor de combustível em materiais amostrados do perfil de sondagem SD-03, posicionado sobre a anomalia 12. Ambas as anomalias 11 e 12 estão diretamente à jusante da área de tancagem.

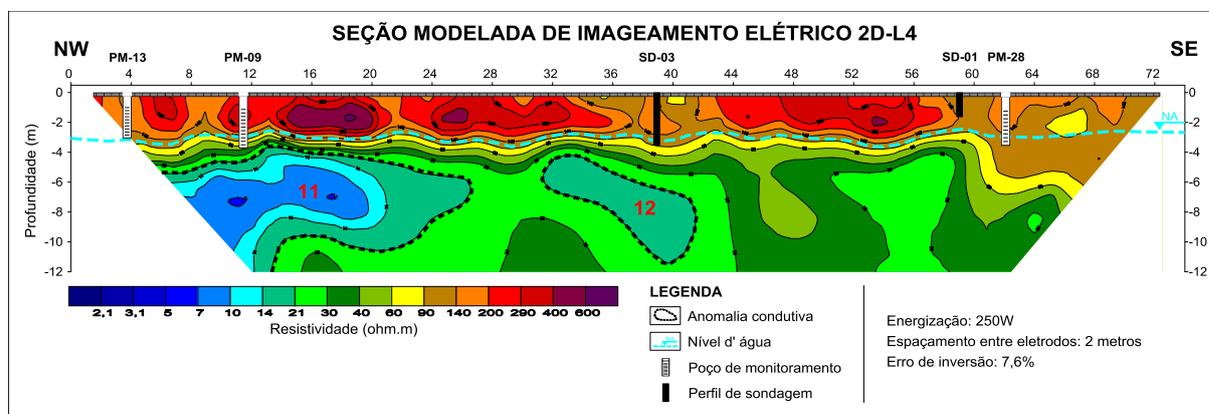
Os valores de resistividades que correspondem os intervalos entre 20 a 60 ohm.m caracterizam também uma área impactada por LNAPL em fase dissolvida, porém com menor concentração de hidrocarbonetos.

A diminuição drástica das concentrações de BTEX, PAH e TPH no PM-28 infere que este local já foi fortemente contaminado por compostos orgânicos. Os valores de resistividade acima de 90 ohm.m, observados nas adjacências do PM-28, indicam o consumo dos hidrocarbonetos pelos processos de biodegradação e o retorno da resistividade original neste local (SAUCK, 2000).

Os valores de resistividades maiores que 60 ohm.m são associados à presença de material arenoso e/ou aterro na zona não saturada e arenoso em profundidades abaixo do nível freático, como identificado no perfil de sondagem SD-03.

O nível do aquífero freático no imageamento 2D-L4 é muito bem marcado pelos contrastes dos altos valores de resistividade acima de 140 ohm.m, desde o topo da superfície até os 3 metros de profundidade.

Figura 22 - Seção Modelada de Imageamento Elétrico 2D-L4



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstram que a utilização do método geofísico eletrorresistividade é eficaz na caracterização de áreas contaminadas por LNAPL, mostrando-se eficiente na identificação de indícios de contaminação no lençol freático. Em estudos de casos envolvendo impacto ambiental, torna-se possível inferir a presença de contaminantes em subsuperfície, otimizando a locação dos pontos a serem investigados para obtenção de dados diretos.

A utilização dessa metodologia mostra que nos primeiros níveis de profundidade, em porções da zona não saturada, os valores de resistividade apresentam uma ampla faixa de variação, refletindo apenas em pequenas variações de saturação existentes (BRAGA, 2006; GANDOLFO, 2007). Isso foi confirmado nas seções de imageamento 2D-L2, 2D-L3 e 2D-L4, onde porções acima do nível d' água demonstraram altos contrastes de valores de resistividade (> 140 ohm.m) marcando muito bem a profundidade do aquífero freático local.

Foram atribuídos valores menores de 20 ohm.m para porções anômalas com concentrações de LNAPL tanto em fase residual quanto dissolvida, assim como valores entre 20 e 60 ohm.m foram designados a locais com menores teores de compostos orgânicos e também para porções distais da pluma de contaminação em fase dissolvida. Diversos trabalhos pesquisados mostram clara evidência de baixa resistividade associados à biodegradação de compostos orgânicos em subsuperfície (ATEKWANA *et al.*, 2000; ATEKWANA, E.; ATEKWANA, E., 2010; BAESSA, 2007; DA SILVA, 2011; JUNQUEIRA, 2017; MOREIRA e BRAGA, 2009; ORTEGA, 2006; SAUCK, 2000; VELOSO, 2016).

O clássico modelo proposto por Sauck (2000) explica muito bem a individualidade de altos e baixos valores de resistividade associados a diferentes zonas de uma pluma de LNAPL. No trabalho realizado abordamos a presença de contaminantes em fase residual e dissolvida, com base nas zonas 2 e 5 (Figura 3).

As anomalias condutivas que indicaram áreas contaminadas por LNAPL próximas ao nível freático, onde os processos de biodegradação são mais intensos, e porções da zona vadosa, são atribuídas à fase residual de acordo com a zona 2. Já em porções adjacentes das anomalias de alta condutividade em ambiente saturado e porções mais distantes da área fonte de contaminação, se associam a fase dissolvida da zona 5.

Os valores de resistividade atribuídos para os diferentes materiais geológicos propostos por Braga (2006) teve uma aplicação fundamental na interpretação dos perfis geoeletricos. Isso se deve diante a possibilidade da correlação dos diferentes valores de resistividade observados nas seções de imageamento, comparados com os materiais interceptados nos perfis de sondagem.

Mesmo com o projeto de remediação em andamento, os resultados indiretos observados neste estudo indicam que ainda existe contaminação em subsuperfície. O histórico ou causa do vazamento não foi informado, porém se observa que a região da área de tancagem continua a representar uma área fonte de contaminação, sendo que os baixos valores de resistividade indicam produto em biodegradação (vazamento antigo). Destaca-se ainda que a anomalia de baixa resistividade observada no extremo NW das seções 2D-L3 (anomalia 9) e 2D-L4 (anomalia 11) indicam que a contaminação por fase dissolvida extrapola os limites da área do posto de serviços.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo realizado na área do posto de serviços no município de Novo Hamburgo/RS, com histórico de contaminação por compostos orgânicos, teve a finalidade de avaliar a eficiência do método geofísico eletrorresistividade na detecção e mapeamento de áreas contaminadas. Os resultados obtidos mostraram o grande potencial de aplicação deste método na avaliação ambiental da área estudada, permitindo estabelecer uma confiável relação com o ambiente geológico local e seu histórico de contaminação por LNAPL.

A aplicação do método geofísico permitiu identificar que ocorre ainda a presença de contaminantes derivados de petróleo em subsuperfície. Os resultados apresentados pelas 4 seções modeladas de IE permitiram utilizar o modelo geoeletrico condutivo de pluma de LNAPL proposto por Sauck (2000).

As anomalias condutivas ($< 20 \text{ ohm.m}$) presentes nos imageamentos 2D-L2 e 2D-L3 indicaram claramente que a pluma de contaminação por LNAPL teve início nas proximidades onde se encontram a área de tancagem. Os contaminantes em subsuperfície seguem uma tendência de deslocamento para porção SW da área de estudo, no sentido do fluxo d' água subterrânea.

Da mesma forma, as áreas anômalas presentes no imageamento 2D-L4 sugerem uma porção mais distal da pluma de contaminação, em relação a sua origem, que aparece nos imageamentos 2D-L2 e 2D-L3. Por outro lado, as anomalias encontradas na seção de imageamento 2D-L1 sugerem a presença de contaminação decorrente tanto da área de lavagem de veículos quanto de contaminações pontuais.

Pode-se ressaltar que em trabalhos como este, realizados no Brasil, deve ser considerado o alto teor de etanol adicionado à gasolina, que inibe a biodegradação de compostos orgânicos e aumenta a solubilidade e mobilidade dos compostos BTEX dissolvidos em águas subterrâneas. Este fato corrobora com a interpretação de que a área fonte de contaminação pode ser associada a um acidente ou vazamento mais antigo.

A profundidade do aquífero freático local foi muito bem marcada nos imageamentos 2D-L2, 2D-L3 e 2D-L4, podendo ser correlacionado com os dados diretos de nível d' água em PMs do dia da aquisição dos dados geofísicos. Isso indica que os contaminantes nestes locais estão concentrados, preferencialmente,

na zona saturada, mostrando a eficiência dos trabalhos de remediação em porções mais superficiais. Já o imageamento 2D-L1 apresenta indícios de contaminação tanto na zona saturada quanto em porções da zona vadosa.

Como já passaram 15 meses das últimas análises químicas feitas em águas subterrâneas antes dos levantamentos geofísicos, tendo em vista a dinâmica de movimentação das plumas de LNAPLs em subsuperfície, é recomendado fazer novas amostragens tanto de solos quanto de águas subterrâneas, nos locais que se encontram as anomalias condutivas.

É indicado também a locação de novos PMs na porção oeste da área de estudo, onde as anomalias geolétricas ultrapassaram os limites de investigação observados nas seções 2D-L3 e 2D-L4, para melhor demarcar o limite da pluma de contaminação. Aconselha-se a instalação de PMs mais profundos, uma vez que as seções revelaram anomalias de baixa resistividade nas porções mais profundas do aquífero e abaixo da base dos poços já instalados. Isso irá intensificar os trabalhos de remediação, principalmente, em níveis mais profundos da área.

Conclui-se que a utilização do método geofísico eletrorresistividade, associado ao levantamento histórico da área e a geologia local, foram de suma importância para caracterizar esta área contaminada. Desta maneira, demonstra-se que é uma ferramenta capaz de auxiliar na recuperação do local de diversas formas, como na locação de PMs, em amostragens diretas de solos e águas subterrâneas e comprovar a eficiência do sistema de remediação no processo de descontaminação da área.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP) (Brasil). **Nota de esclarecimento da ANP ao consumidor**. Brasília, DF: ANP, 2019. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/noticias/4983-nota-esclarecimento-consumidor-14dez2018>. Acesso em: 14 Ago. 2019.
- ARAÚJO, L. M.; FRANCA, A. B.; POTTER, P. E. 1995. **Aquífero gigante do MERCOSUR no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. Mapas hidrogeológicos das Formações Botucatu, Piramboia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Taquarembó**. Curitiba: UFPR/PETROBRÁS, 1995. 16p.
- ATEKWANA, Estella A.; ATEKWANA, Eliot A. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: a review. **Surveys in Geophysics**, v. 31, n. 2, p. 247-283, 2010.
- ATEKWANA, Estella A.; SAUCK, William A.; WERKEMA JR, Douglas D. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. **Journal of applied Geophysics**, v. 44, n. 2-3, p. 167-180, 2000.
- BAESSA, Marcus Paulus Martins. **Assinaturas geoeletricas em área contaminada por hidrocarboneto no pólo industrial de Cubatão-SP**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007.
- BERTIN, Jacques; LOEB, Julien. **Experimental and theoretical aspects of induced polarization**. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1976.
- BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. 2006. Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, 2006.
- BRAGA, Antônio Celso de Oliveira; MOREIRA, César Augusto; CARDINALI, Maira Tozzi. Variação temporal da resistividade elétrica em contaminação por gasolina. **Geociências**, 2008, p. 517-525.
- BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. **Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Áreas Contaminadas**. São Paulo, SP: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/o-que-sao-areas-contaminadas/>. Acesso em: 03 Jul. 2020.
- CAVALLARI, Fernanda. **Caracterização geofísica de contaminação por hidrocarbonetos em acidente ferroviário no município de Botucatu-SP**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2017.

CLIMATE-DATA.ORG. **Dados climáticos para cidades mundiais**. Disponível em: <http://pt.climate-data.org/>. Acesso em: 05 ago. 2019.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2006. 1 mapa, color. Escala 1:750.000. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf. Acesso em: 12 nov. 2019.

CONICELLI, Bruno Pirilo. A Gestão das águas subterrâneas transfronteiriças: O caso do Sistema Aquífero Guarani. *In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 15., 2007, São Paulo. **Anais eletrônicos** [...]. São Paulo: ABAS, 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23283>. Acesso em: 05 nov. 2019.

CORSEUIL, Henry Xavier; ALVAREZ, Pedro J. J. Natural bioremediation perspective for BTX-contaminated groundwater in Brazil: effect of ethanol. **Water Science and Technology**, vol. 34, n. 7-8, p. 311-318, 1996.

COSTA, Ana Hilda Romero; NUNES, Cristina Cardoso; CORSEUIL, Henry Xavier. Biorremediação de águas subterrâneas impactadas por gasolina e etanol com o uso de nitrato. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n.2, p. 265-274, 2009.

COSTA, Tallita Tostes da. **Avaliação da vulnerabilidade de aquíferos por meio de análise de vazamentos de postos de combustível**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

ELIS, Vagner Roberto. **A geofísica como ferramenta para detectar e mapear contaminação**. São Paulo: IAG/USP, 1999. Disponível em: http://www.iag.usp.br/agua/geo/contaminacao_vagner.pdf. Acesso em: 05 ago. 2019.

ENVIRONMENTAL AND ENGINEERING GEOPHYSICS (EEG). **Geoelétrico 48 canais**. São Paulo: EEG, c2020. Disponível em: <https://eeg-geofisica.com.br/geoeletrico-48-canais-s/>. Acesso em: 10 jun. 2020.

FOGAÇA, Paulo Henrique de Campos. **Contaminação do lençol freático por hidrocarbonetos na região de Avaré-SP**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.

GALLAS, José Domingos Faraco. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental**. 2000. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2000.

GANDOLFO, Otávio Coaracy Brasil. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. Tese (Doutorado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, 2007.

HALLOF, Philip George. **On the interpretation of resistivity and induced polarization field measurements**. 1957. Thesis (Doctor of Science) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1957.

JUNQUEIRA, Paula Gomes. **Estudo geofísico em área contaminada por diesel no município de Cerquilha (SP)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2017.

KNÖDEL, Klaus; LANGE, Gerhard; VOIGT, Hans-Jürgen. **Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies**. Hannover Federal Institute for Geosciences and Natural Resources. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 1374 p.

KUHN, Isadora Aumond. **Análise das assinaturas isotópicas de chumbo na avaliação das águas subterrâneas e superficiais da bacia do rio dos Sinos, RS**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

LAVINA, Ernesto Luiz Corrêa; FACCINI, Ubiratan Ferrucio; RIBEIRO, Hugo José. A Formação Pirambóia (Permo-Triássico) no Estado do Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**, São Leopoldo, vol. 38, n.1, p. 179-197, 1993.

LOKE, M. H.; BARKER, R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. **Geophysical Prospecting**, vol. 44, n. 3, p. 499-523, 1996.

LOKE, M. H. **RES2DINV v. 3.53. Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least square method**: Manual. Penang: Geotomo Software, 2003.

LOWRIE, William. **Fundamentals of geophysics**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.

MACHADO, José Luiz Flores. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero no Rio Grande do Sul**. 2005. Tese (Doutorado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2005.

MACHADO, José Luiz Flores; UBIRATAN, Ferrucio Faccini. Influência dos falhamentos regionais na estruturação do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Rio Grande do Sul. *In*: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 51., 2004, São Paulo. **Anais eletrônicos** [...]. São Paulo: ABAS, 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23510/15595>. Acesso em: 05 nov. 2019.

MARQUES, Silvia Guimarães. **Metodologia geofísica para contaminação por hidrocarbonetos-estudo de caso em posto de combustíveis**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, 2007.

MENEZES, Aline Muriel; MOREIRA, César Augusto; ILHA, Lenon Melo; SCHWEIG, Camila. Estudo geofísico de vazamento de combustíveis em posto de abastecimento. **Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 601-609.

MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; MEDEIROS, R. A. Geology of the southeastern Paraná Basin: With Emphasis on Reservoirs and Source Rocks; Field Trip 11-14 November 1998. *In: THE 1998 AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION: PETROLEUM GEOLOGY IN A CHANGING WORLD*, 1998, Rio de Janeiro. **Anais** [...] Rio de Janeiro: 1998, p. 1-20.

MILANI, Edson Jose. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. 1997. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, Edson José; MELO, José Henrique Gonçalves; SOUZA, Paulo Alves de; FERNANDES, Luiz Alberto; FRANÇA, Almério Barros. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MILSON, John. **Field Geophysics**. England: Wiley, 2003. 232 p.

MINOZZO, Marina. **Métodos geofísicos aplicados na avaliação ambiental em uma indústria química na cidade de São Paulo-SP**. 2009. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MOREIRA, César Augusto; DOURADO, João Carlos; BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 383-392, 2006.

MOREIRA, César Augusto; BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 257-264, 2009.

ORELLANA, Ernesto. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua**. Madrid: Paraninfo, 1972. 523 p.

ORTEGA, Rodrigo Alves. **Localização e Delineamento de Pluma de Contaminação por Hidrocarbonetos através dos Métodos GPR e Tomografia Elétrica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2006.

RADAM/BRASIL. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial de terra**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 791 p.

SAUCK, William A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. **Journal of Applied Geophysics**, vol. 44, n. 2-3, p. 151–165, 2000.

SEFA, Valina. 2015. **Mechanism for detecting NAPL in groundwater with resistivity**. Thesis (Master of Science) - Faculty of the Graduate College, Oklahoma State University, Stillwater, 2015.

SILVA, Roberto Tiago Sobrinho da. **Contaminação do subsolo no entorno de um posto de abastecimento de combustíveis e serviços, município de Alagoinhas, Bahia, avaliada por IP-resistividade**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

SOUZA, Danusa Mayara de; LUIZ, José Gouvêa. Radar de penetração no solo aplicado à análise ambiental de posto de combustíveis pós-remediação. **Revista Águas Subterrâneas**, vol. 31, n.3, p. 143-153, 2017.

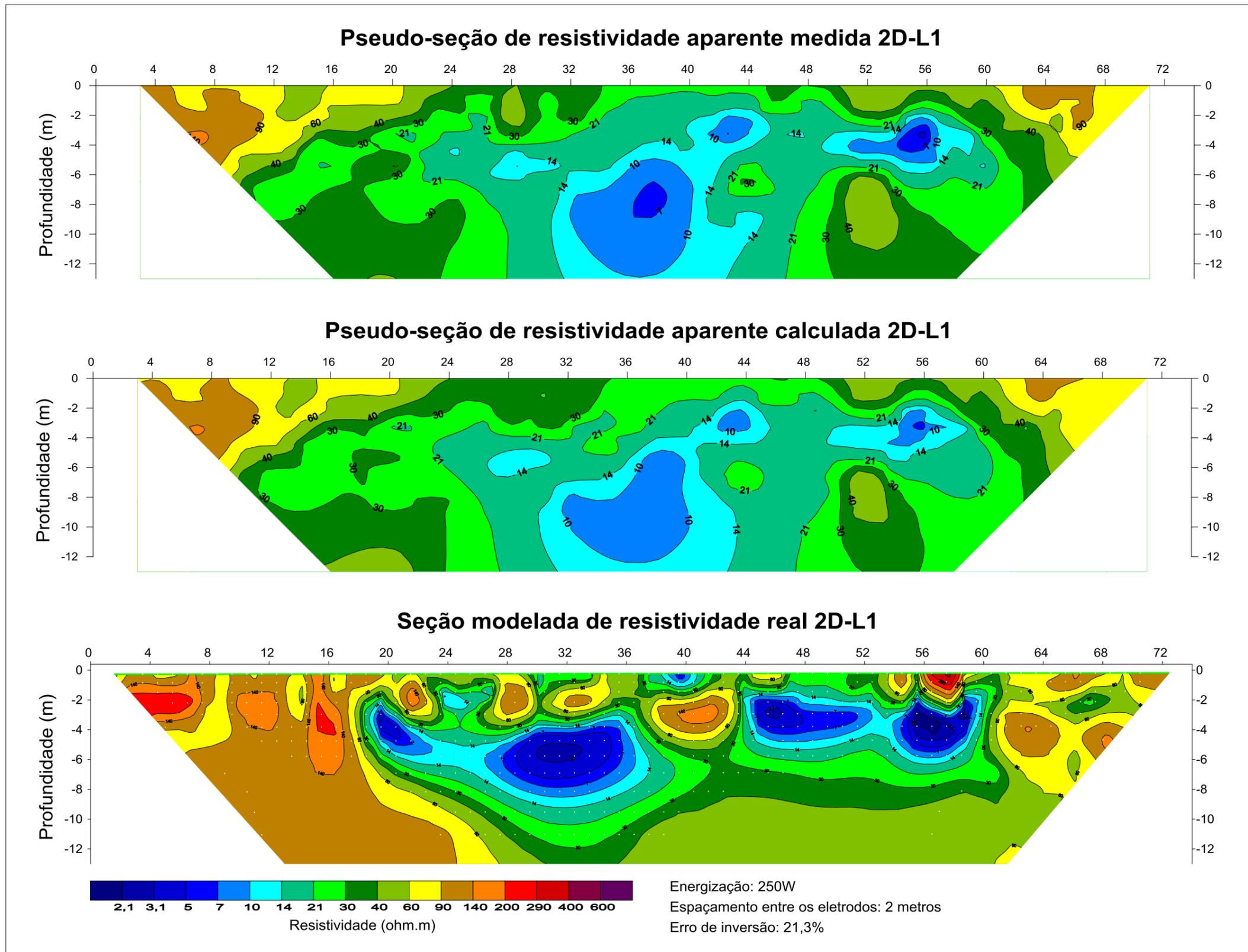
SOUZA, Renata Buzeti Garcia de. **Avaliação da contaminação por hidrocarbonetos do solo e da água da região de Avaré**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **How to Effectively Recover Free Product at Leaking Underground Storage Tank Sites**. A guide for state regulators. EPA/510-R-96-001, 1996.

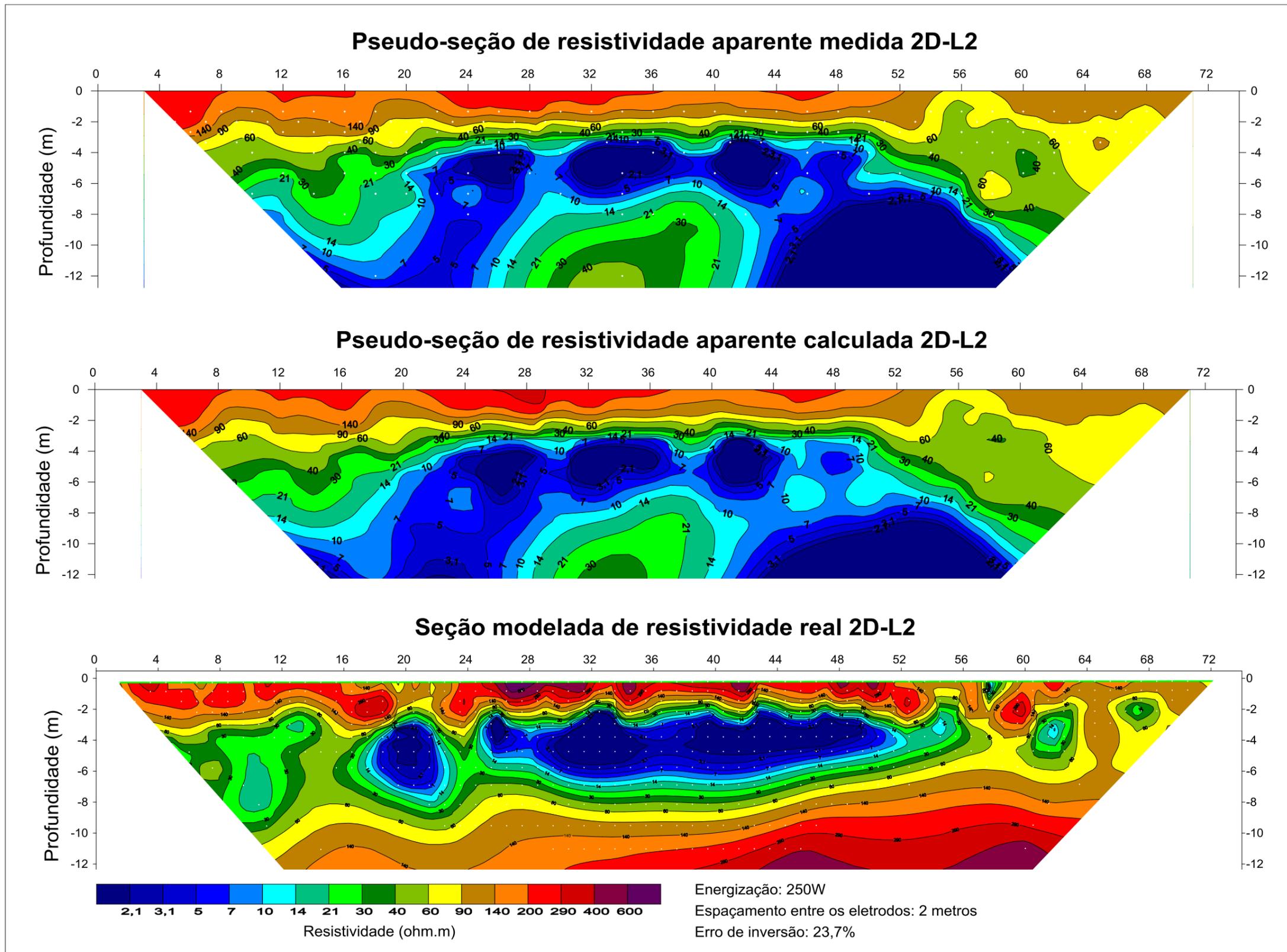
VELOSO, Dimitri Ilich Kerbauy. **Avaliação de contaminação com óleo diesel por meio dos métodos de Eletroresistividade e Polarização Induzida em Santa Ernestina-SP**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2016.

ZALÁN, Pedro Víctor; WOLFF, Sven; CONCEIÇÃO, João Cláudio de Jesus; VIEIRA, Inês Santos; ASTOLFI, Marco Antônio Mendonça; APPI, Valéria Tiriba; ZANOTTO, Osmar Antônio. A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 242-252, 1987.

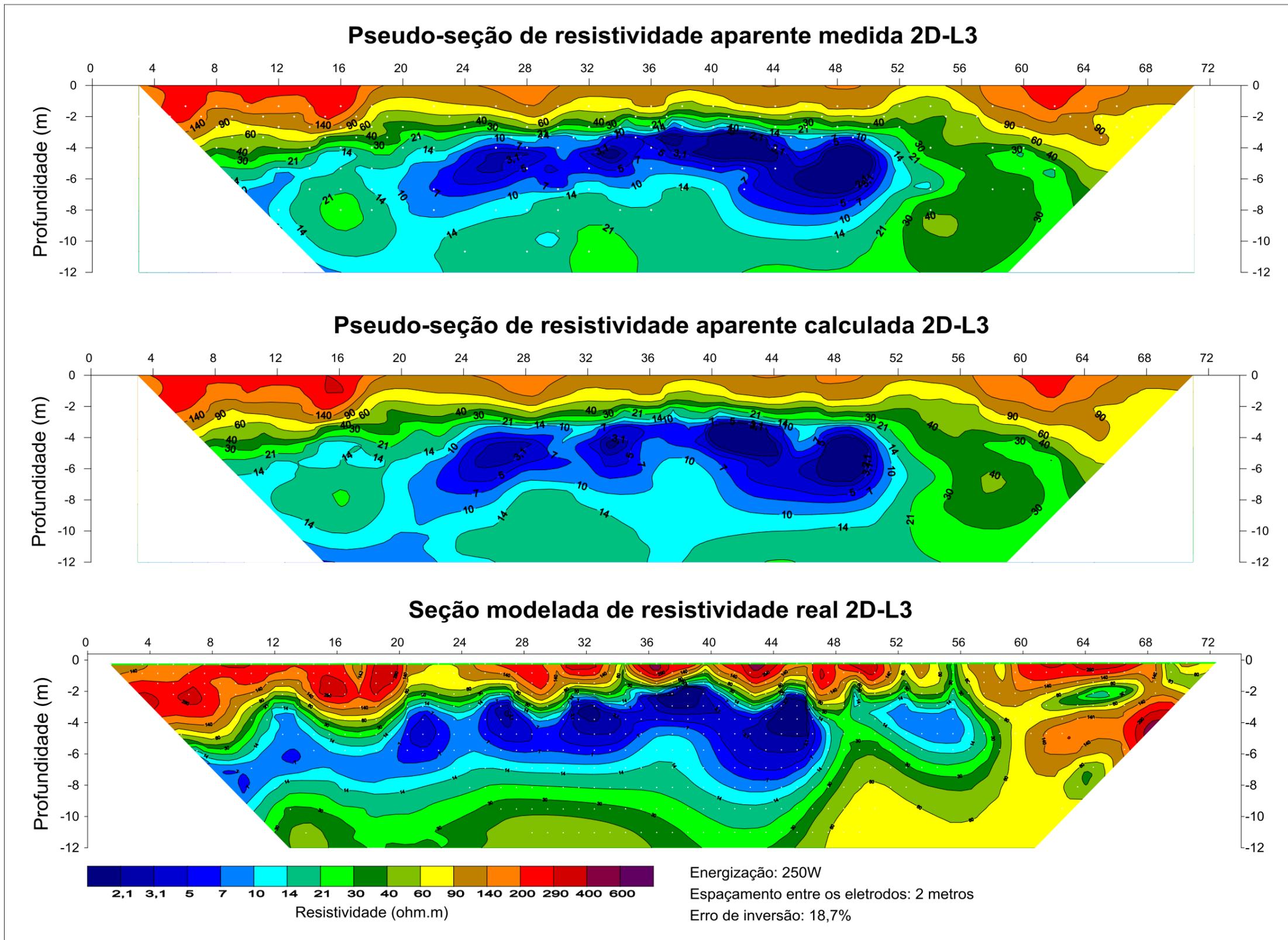
APÊNDICE A – PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE MEDIDA E CALCULADA E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE REAL 2D-L1



APÊNDICE B – PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE MEDIDA E CALCULADA E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE REAL 2D-L2



APÊNDICE C – PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE MEDIDA E CALCULADA E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE REAL 2D-L3



APÊNDICE D – PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE MEDIDA E CALCULADA E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE REAL 2D-L4

