

Universidade Estadual Paulista  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
*Campus de Rio Claro*

**TOMOGRAFIA ELÉTRICA APLICADA NA INVESTIGAÇÃO DE  
FLUXO DE LIXIVIADO EM MEIO FRATURADO EM UM LIXÃO NO  
MUNICÍPIO DE LAVRAS DO SUL (RS)**

Rodolfo Busolin Alves dos Santos

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Dissertação de Mestrado elaborada  
junto ao Programa de Pós-Graduação  
em Geociências e Meio Ambiente, para  
obtenção do Título de Mestre em  
Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro – SP  
2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“Júlio de Mesquita Filho”  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
*Campus de Rio Claro*

RODOLFO BUSOLIN ALVES DOS SANTOS

TOMOGRAFIA ELÉTRICA APLICADA NA INVESTIGAÇÃO  
DE FLUXO DE LIXIVIADO EM MEIO FRATURADO EM UM  
LIXÃO NO MUNICÍPIO DE LAVRAS DO SUL (RS)

Dissertação de Mestrado  
apresentada ao Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas do  
Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista “Júlio  
de Mesquita Filho”, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Geociências e Meio  
Ambiente

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro - SP  
2018

551      Busolin, Rodolfo Alves dos Santos  
B979t      Tomografia elétrica aplicada na investigação de fluxo de  
lixiviado em meio fraturado em um lixão no município de  
Lavras do Sul (RS) / Rodolfo Busolin Alves dos Santos. - Rio  
Claro, 2018  
93 f. : il., figs., tabs., quadros, fots., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Cesar Augusto Moreira

1. Geofísica. 2. Resíduos sólidos. 3. Lixiviado. 4. Fratura.  
5. Eletrorresistividade. 6. Polarização induzida. I. Título.

RODOLFO BUSOLIN ALVES DOS SANTOS

TOMOGRAFIA ELÉTRICA APLICADA NA INVESTIGAÇÃO  
DE FLUXO DE LIXIVIADO EM MEIO FRATURADO EM UM  
LIXÃO NO MUNICÍPIO DE LAVRAS DO SUL (RS)

Dissertação de Mestrado  
apresentada ao Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas do  
Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista “Júlio  
de Mesquita Filho”, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Geociências e Meio  
Ambiente

Comissão  
Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira  
Prof. Dr. João Carlos Dourado  
Prof. Dr. José Ricardo Melges Bortolin

Rio Claro, SP 06 de Fevereiro de 2018  
Aprovado

A mulher mais importante da minha vida, minha mãe Lúcia (*in memoriam*), que viu meu potencial e o melhor de mim sempre.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente minha família, que sempre me apoiou a realizar o Mestrado e me incentivou na Graduação e Pós-Graduação. Principalmente minha mãe Lúcia (*in memorian*), meu pai Waldemar e meus irmãos Gregório, Juliana e Alexander.

Minha filha de outra espécie Safira, que por mais que não entenda muitas coisas, sempre percebeu quando estava mal e ficava sempre ao meu lado.

Minhas tias Marô, Esmeralda e Vera, meu tio Oscar. Meu vô Oscar (*in memorian*) e minha vó Therê que ainda pergunta o que eu estudo, pois já terminei a faculdade.

Meus amigos que são minha segunda família, a qual posso contar sempre para qualquer coisa que precisar. Jandir, Marly e Mah por lerem o trabalho e ajudarem com suas considerações, Natália, Camila, Gabriel, Kelson, Gustavo, Willian e Pedro pelo apoio. Além de meus amigos que fiz lá em Caçapava do Sul – RS.

Agradeço especialmente ao meu Orientador Prof. Dr. César Augusto Moreira, pela disponibilidade, paciência, conhecimentos passados e tudo mais. Aos ajudantes do campo Lenon e Bruno, que sem vocês não haveria braços suficientes para carregar os equipamentos.

Quando acontecem tragédias,  
tentamos achar alguém para culpar.  
Na ausência de um candidato melhor,  
culpamos a nós mesmo. Você não é  
culpado. Ninguém é culpado.

Lady Violet Crawley

## RESUMO

A área de estudo está localizada na cidade de Lavras do Sul – RS, que é uma antiga pedreira que foi reaproveitada para a deposição dos resíduos oriundo do município. O objetivo principal é realizar o detalhamento geofísico e estrutural da contaminação do antigo lixão e correlacionar a percolação do lixiviado com as zonas fraturadas, com o uso de dois métodos de investigação (Eletrorresistividade e Polarização Induzida) e os dois arranjos (Dipolo-Dipolo e Schlumberger). Foram realizados 12 perfis de resistividade e cargabilidade na direção 45°N, processados em 2D e 3D, e foi determinado uma possível presença de zonas de contaminação e percolação de lixiviado para fora da área do lixão. Também foi possível determinar onde estavam dispostos os resíduos sólidos e os limites do lixão, zonas fraturadas com a presença de lixiviado e zonas fraturadas com a presença de sulfetos que aprofundam até 36 m. Desde o início da operação do lixão a contaminação atingiu diversos metros de profundidade, porém com o tempo e a atenuação natural, essas zonas de fratura fecharam devido a cristalização de sulfeto. Os dois arranjos apresentaram resultados satisfatórios para os valores de resistividade. Com relação aos valores de cargabilidade, o arranjo Schlumberger apresentou melhores resultados do que o Dipolo-Dipolo. A geofísica demonstrou ser uma ferramenta importante no estudo de contaminações em rochas cristalinas, principalmente pela sua capacidade de detecção de fraturas e sua profundidade atingida.

**Palavras-Chave:** resíduos sólidos, lixiviado, fratura, Eletrorresistividade, Polarização Induzida.

## **ABSTRACT**

The study area is located in the city of Lavras do Sul - RS, which is an old quarry that was reused for the deposition of waste from the municipality. The main objective is to perform the geophysical and structural detailing of the contamination of the old dump and to correlate the percolation of the leachate with the fractured zones, using the two research methods (DC Resistivity and Induced Polarization) and the two arrangements (Dipole-dipole and Schlumberger). By performing 12 profiles of resistivity and chargeability in the 45°N direction, processed in 2D and 3D, a possible presence of contamination zones and percolation of leachate outside the dump area was determined. It was also possible to determine where the solid wastes and the boundaries of the dump were located, fractured zones with the presence of leachate and fracture zones with the presence of sulfides that deepen up to 36 m. From the beginning of the operation of the dump the contamination reached several meters deep, but with time and the natural attenuation, these zones of fracture closed due to mineral neoformation of sulfide. Both arrangements presented satisfactory results for the resistivity values, in relation to the chargeability values, the Schlumberger arrangement presented better results than the Dipole-Dipole. Geophysics has been shown to be an important tool in the study of contaminations in crystalline rocks, mainly due to its ability to detect fractures and its depth.

**Keywords:** Solid waste, leachate, fracture, DC Resistivity, Induced Polarization

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** - Mapa de situação da área de estudo na cidade de Lavras do Sul, localizada próxima ao Rio Camaquã das Lavras. ....4
- Figura 2** - Mosaico de fotos que mostra três visões do lixão. (A) Foto com visada para o sul e delimitação do lixão a oeste. (B) Foto com visada para noroeste. Note a presença de um desnível acentuado que vai da parte central do lixão para o limite inferior a sudeste, além da presença de resíduos aflorantes nos taludes do lixão. (C) Foto com visada para nordeste. Note a presença de uma vala que separa a área do lixão com a área mais ao sul. Nessa vala há a presença de resíduos aflorantes e serve como um caminho para as águas pluviais e conseqüentemente poluição do rio próximo. ....7
- Figura 3** - Mosaico de fotos que evidencia a presença de resíduos aflorantes e sua forma de escoamento e percolação pelo solo. (A) Visada a noroeste do lixão com evidência de locais aflorantes de resíduos. (B) Foto do afloramento de resíduos e caminhos preferenciais para a percolação do lixiviado pelo terreno. (C) Foto do afloramento de resíduos onde foi constatado através do campo o fluxo de lixiviado entre os resíduos, além dos caminhos de percolação e acúmulo do lixiviado. ....8
- Figura 4** - Foto da porção a sudeste, fora dos limites do lixão, onde o terreno é abaixo da cota dos resíduos. Note a presença de poças de lixiviado que seguem fluxo para um córrego afluente do rio Camaquã das Lavras. ....8
- Figura 5** - Mapa dos domínios tectônicos do Estado do Rio Grande do Sul, com ênfase para o Escudo Cristalino Sulriograndense..... 13
- Figura 6** - Mapa da geologia local da região de Lavras do Sul..... 15
- Figura 7** – Amostra do Monzogranito Híbrido, com textura porfirítica grossa com fenocristais de feldspato potássico. .... 16
- Figura 8** - Modelo esquemático de como é a disposição de resíduos sólidos de um lixão e sua interação com o substrato geológico..... 19
- Figura 9** - Modelo da disposição das fraturas em rochas cristalinas para a produção de um poço e modelo da disposição dos poços em relação as fraturas e da recarga do aquífero. ....27
- Figura 10** - Esquema da aplicação de uma corrente elétrica em um circuito com um material resistivo.....30
- Figura 11** - Modelo da passagem da corrente elétrica por um material. A resistência do material vai depender das suas dimensões (comprimento e área).....30
- Figura 12** - Esquema da propagação da corrente elétrica no substrato geológico vista em seção (a) e no plano (b).....31

<b>Figura 13</b> – Relação das distâncias apresentadas entre eletrodos A e B para os eletrodos M e N, para elaboração da equação.....	32
<b>Figura 14</b> - Esquema de como a presença de partículas de argilominerais atraem os íons dispersos. ....	35
<b>Figura 15</b> - Esquema de como bloqueios dentro dos poros direcionam os íons dispersos e de como um minério metálico atrai esses íons. ....	35
<b>Figura 16</b> – Gráfico de decaimento da corrente em subsuperfície, no qual a cargabilidade é obtida pelo cálculo da área de decaimento $T_1$ e $T_2$ .....	36
<b>Figura 17</b> – Esquema do perfil de dados obtidos em um levantamento de tomografia elétrica.....	37
<b>Figura 18</b> - Esquema da disposição e abertura dos eletrodos no arranjo eletródico Schlumberger. ....	38
<b>Figura 19</b> - Esquema da disposição e abertura dos eletrodos no arranjo eletródico Wenner. ....	39
<b>Figura 20</b> - Esquema de movimentação dos eletrodos feita para a obtenção de dados em diferentes níveis de investigação. O arranjo utilizado no esquema é o Dipolo-Dipolo.....	40
<b>Figura 21</b> - Mapa com os perfis de tomografia elétrica realizados, com os limites do lixão e as curvas de nível topográfico, evidencia o declive da área de estudo para o Rio Camaquã das Lavras. ....	45
<b>Figura 22</b> - Mosaico de fotos que mostra as fases de levantamento geofísico. (A) Preenchimento do eletrodo não polarizável com solução de sulfato de cobre. (B) Vista de um dos perfis de tomografia elétrica. (C) Resistivímetro conectado a bateria, durante o levantamento de dados em campo, além dos cabos de conexão e do eletrodo não polarizável. ....	46
<b>Figura 23</b> - Diagrama de Roseta das principais zonas fraturadas da área.....	48
<b>Figura 24</b> – Mosaico das linhas de resistividade do arranjo Dipolo-Dipolo (Linhas 1 a 6) e da linha de referência. Destaque para a zonas de possível contaminação (baixa resistividade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.....	51
<b>Figura 25</b> - Mosaico das linhas de resistividade do arranjo Schlumberger (Linhas 1 a 6) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa resistividade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.....	52
<b>Figura 26</b> - Mosaico das linhas de resistividade do arranjo Dipolo-Dipolo (Linhas 7 a 12) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa resistividade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.....	54

**Figura 27** - Mosaico das linhas de resistividade do arranjo Schlumberger (Linhas 7 a 12) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa resistividade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.....55

**Figura 28** - Mosaico das linhas de cargabilidade do arranjo Dipolo-Dipolo (Linhas 1 a 6) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa cargabilidade), zonas de mineralização de sulfetos (alta cargabilidade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão. ....57

**Figura 29** - Mosaico das linhas de cargabilidade do arranjo Schlumberger (Linhas 1 a 6) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa cargabilidade) e zonas de mineralização de sulfetos (alta cargabilidade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão. ....58

**Figura 30** - Mosaico das linhas de cargabilidade do arranjo Dipolo-Dipolo (Linhas 7 a 12) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa cargabilidade) e zonas mineralização de sulfetos (alta cargabilidade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão. ....59

**Figura 31** - Mosaico das linhas de cargabilidade do arranjo Schlumberger (Linhas 7 a 12) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa cargabilidade) e zonas mineralização de sulfetos (alta cargabilidade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão. ....60

**Figura 32** - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Dipolo-Dipolo, da superfície até 9 m de profundidade. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas.....62

**Figura 33** - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Dipolo-Dipolo, de 12 m de profundidade até 24 m. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas. ....63

**Figura 34** - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Dipolo-Dipolo, de 27 m de profundidade até 36 m. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas.....64

**Figura 35** - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Schlumberger, da superfície até 9 m de profundidade. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas.65

**Figura 36** - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Schlumberger, de 12 m de profundidade até 24 m. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas.....67

**Figura 37** - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para arranjo Schlumberger, de 27 m de profundidade até 36 m. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas.....68

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2.	OBJETIVOS .....	3
3.	ÁREA DE ESTUDO .....	4
3.1	Localização e Histórico da Área.....	4
3.2	Fisiografia.....	9
3.3	Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã e Hidrogeologia .....	10
3.4	Geologia Regional.....	11
3.5	Geologia Local .....	14
4.	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	17
4.1	Definição e Classificação dos Resíduos Sólidos.....	17
4.2	Formas de Disposição Final dos Resíduos Sólidos .....	18
4.2.1	Lixão .....	18
4.3	Produtos da Decomposição dos Resíduos Sólidos.....	21
4.3.1	Biogás.....	21
4.3.2	Chorume.....	22
5.	ÁGUA SUBTERRÂNEA E AQUÍFEROS.....	25
5.1	Tipos de Aquífero .....	25
5.2	Aquíferos em Rochas Cristalinas .....	26
6.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
6.1	Métodos Geoelétricos .....	28
6.2	Polarização Induzida .....	34
6.2.1	Polarização de Membrana.....	34
6.2.2	Polarização de Eletrodo.....	35
6.2.3	Cargabilidade.....	36
6.3	Tomografia Elétrica .....	37
6.4	Arranjos de Campo .....	37
6.4.1	Schlumberger .....	38
6.4.2	Wenner.....	39
6.4.3	Dipolo-Dipolo .....	39
6.5	Trabalhos de geofísica aplicada em estudos ambientais .....	40
7.	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTOS.....	44
7.1	Aquisição Geofísica.....	44
7.2	Análise e Interpretação dos Dados .....	47
7.3	Controle Estrutural .....	47
8.	RESULTADOS.....	48

8.1	Controle Estrutural .....	48
8.2	Geofísica 2D .....	48
8.2.1	Resistividade .....	49
8.2.2	Cargabilidade.....	56
8.3	Modelamento 3D .....	61
8.3.1	Resistividade .....	61
8.3.2	Cargabilidade.....	64
9.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Com o início da Revolução Industrial do século XVIII, houve uma modificação do panorama urbano, ou seja, uma divisão de zonas comerciais, residenciais e industriais (MORANDI & GIL, 2000). Com esse advento industrial muito forte a partir do século XX, novas pesquisas, tecnologias e produtos foram criados e substituídos, que geraram resíduos dos mais diversos tipos, desde resíduos comuns de madeira até alguns mais complexos que possuíam em sua composição diversos elementos.

O homem é o principal agente causador de poluição e contaminação, que impacta o meio ambiente de forma ampla, e cabe a ele resolver esses problemas que afetam não somente o ser humano, como outros seres vivos. Para tal, é necessária uma abordagem multidisciplinar, que envolva várias áreas de conhecimento para resolver de forma total um problema.

O monitoramento de um passivo ambiental pode ser oneroso quando são utilizadas técnicas diretas de investigação (como sondagens e análises químicas) e, geralmente, não se tem como saber onde aplicar essas técnicas. Por isso, realizar um mapeamento em subsuperfície do substrato geológico através dos métodos geofísicos é o ideal para um monitoramento constante e de menor custo que as técnicas diretas.

A utilização do conhecimento da geofísica e da geologia, podem auxiliar na resolução de problemas ambientais, nas diversas áreas de concentração, como a contaminação e poluição dos recursos hídricos e dos solos, pelos diversos tipos de contaminantes existentes, desde metais, até solventes orgânicos e resíduos.

A complexidade do meio geológico, que é heterogêneo, atrelado a componentes estranhos a sua formação (contaminantes), pode ser investigado através dos métodos geofísicos. Os métodos elétricos e eletromagnéticos são os mais usados para a investigação ambiental, pois esses apresentam parâmetros de fácil visualização, quando ocorre alguma diferenciação do meio. Além de serem mais baratos, comparado a outros métodos geofísicos e métodos diretos, são mais rápidos na obtenção de dados e resultados.

A área de estudo está localizada sobre a porção central do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), em rochas granodioríticas. Por se tratar de um

embasamento cristalino datado do pré-cambriano, sofreu diversos processos tectônicos que ocasionaram fraturas e falhamentos. Por ser um lixão que está assentado em uma antiga pedreira de granito, a complexidade do local e do passivo ambiental é elevada, pois não há muitos trabalhos que tenham essa abordagem.

O método da Eletrorresistividade é amplamente usado nos estudos ambientais de contaminação e atrelado a dados de Polarização Induzida, fornecem informações a mais para a investigação ambiental. Porém, há uma escassez de estudos de locais de disposição de resíduos em rochas ígneas ou metamórficas, por haver uma maior complexidade no meio geológico. Por isso o conhecimento estrutural da área é necessário para auxiliar na observação de falhas e fraturas no local, além da montagem correta da aquisição, para obter como resultado um bloco diagrama em três dimensões, que facilita a interpretação e entendimento do fenômeno estudado.

A geofísica entra nessa justificativa como uma ferramenta fundamental na investigação e monitoramento ambiental, pois os métodos que serão aplicados são capazes de detectar anomalias de resistividade elétrica, que podem ser relacionados aos contaminantes no ambiente e zonas fraturadas que podem estar preenchidas por esses contaminantes. Além de prover informações espaciais do passivo ambiental e pode dar informação do melhor método de recuperação, que técnicas diretas não teriam conseguido investigar, como o caso de fraturas em subsuperfície.

## **2. OBJETIVOS**

Este projeto tem como objetivo principal realizar uma investigação do fluxo de lixiviado oriundo de um antigo lixão no município de Lavras do Sul – RS com suas zonas adjacentes e em zonas fraturadas, através de dados obtidos por métodos geofísicos (Eletrorresistividade e Polarização Induzida).

Os objetivos secundários podem ser divididos em dois:

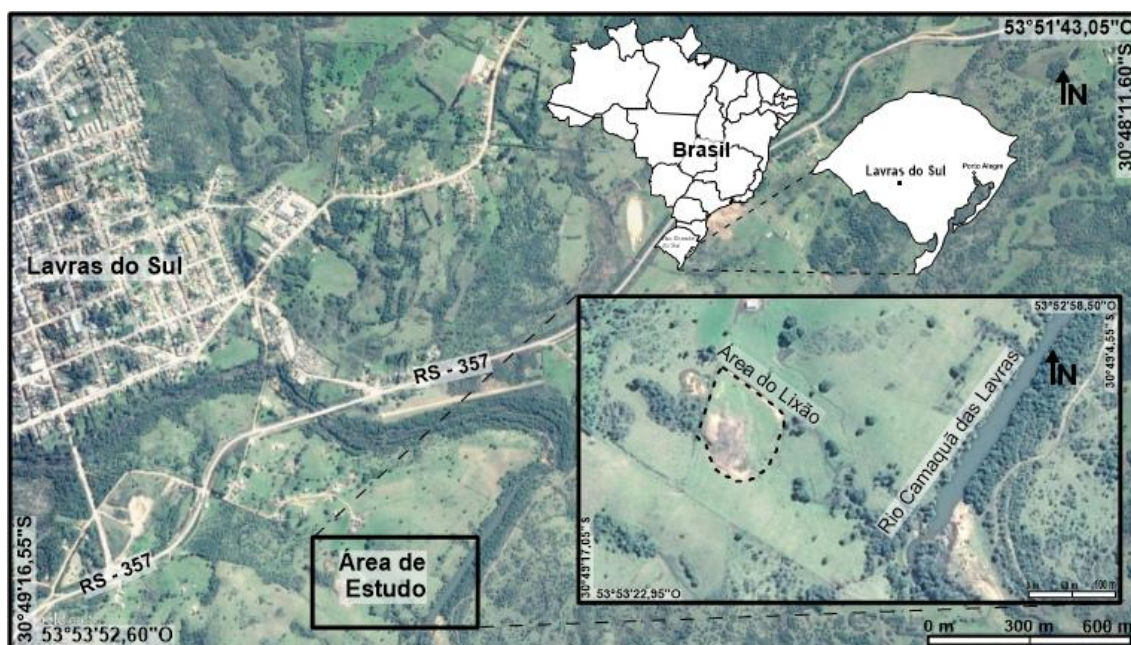
- Realizar a comparação dos dois métodos de investigação e verificar a exequibilidade para áreas de resíduos sólidos dispostos em rochas ígneas com zonas fraturadas e suas possíveis interações com a degradação da matéria orgânica nos resíduos sólidos.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 Localização e Histórico da Área

A área de estudo está localizada a cerca de 600 metros da Rodovia Estadual RS – 357, no trecho que compreende o município de Lavras do Sul – RS (FIGURA 1). A área está situada na zona rural da cidade, distante 1,5 km do centro, próximo ao rio Camaquã das Lavras, que era uma antiga mina de extração de granito para insumos da construção civil.

Figura 1 - Mapa de situação da área de estudo na cidade de Lavras do Sul, localizada próxima ao Rio Camaquã das Lavras.



Fonte: Modificado de *Google Earth*.

Com o encerramento das atividades da antiga pedreira de granito, a área passou a receber resíduos sólidos urbanos oriundos de Lavras do Sul, como alternativa de recuperar a cava, no início da década de 1980, operado até 2011.

Todas as informações sobre o processo civil referido, foram retiradas diretamente dos documentos digitalizados que foram disponibilizados pela Prefeitura de Lavras do Sul, como uma fonte de informações importantes para a pesquisa.

Desde o início da operação do lixão, até o ano de 1999, o empreendimento operava de modo ilegal, pois não possuía os documentos necessários para a sua implantação e operação, além de estar ambientalmente incorreto, principalmente devido à falta de legislação ambiental vigente na época. Além do não uso de métodos construtivos de engenharia, estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Em 1999, uma Patrulha Ambiental do 6º Regimento de Polícia Montada, denunciou através de um relatório sobre as irregularidades encontradas no lixão, durante uma rotina de inspeção. As informações que constam no relatório são referentes as irregularidades, tais como:

- Depósito irregular de resíduos de diversas origens, em uma área próxima ao rio Camaquã das Lavras e com declividade.
- Poluição e contaminação dos córregos em Área de Preservação Permanente.
- Contato de animais domésticos com os resíduos, além da comercialização de alimentos de origem animal. Condições precárias dos animais.
- Resíduos espalhados pela área, próximo das casas e açudes de abastecimento.

A partir dessa denúncia prévia, foi iniciado o Inquérito Civil Nº001/2002 no Ministério Público Federal, que tem a tratativa de investigar as irregularidades do lixão municipal, além de adequar a área para seu uso e sua posterior recuperação ambiental. No mesmo ano em que o inquérito foi iniciado, foi pedido uma auditoria no local para averiguar 24 itens indexados em ofício para a Prefeitura Municipal de Lavras do Sul. O item mais importante é que desde o início da operação do lixão, o empreendimento não possuía nenhum tipo de licença, necessária para sua operação, com o órgão ambiental estadual, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS (FEPAM).

Após a exigência da Licença de Operação pelo Ministério Público, junto a FEPAM, foram feitas algumas obras que pudessem adequar a área para obter a licença, tais como a criação de valas ao redor do lixão para escoamento

de águas superficiais e possivelmente de chorume, coletor e tanques de tratamento do chorume e a cobertura dos resíduos com argila. Essas medidas não foram realizadas no prazo estipulado e constatado em relatório técnico do Ministério Público. Posteriormente a prefeitura teve que apresentar um Projeto de Recuperação de Área Degradada.

A Prefeitura de Lavras do Sul deveria apresentar três, ou mais, áreas para um novo aterro sanitário, para conseguir a obtenção da Licença Prévia, pois o até então lixão era uma área que estava em processo de adequação, mas que logo estaria com sua vida útil comprometida.

Em 2008, diversos municípios da região da campanha, se uniram para realizar o “Protocolo de Intenções Visando a Constituição de Consórcio Público de Gerenciamento Regional de Resíduos Sólidos Urbanos na Região da Campanha”, que visava dar mais autonomia a esses municípios com relação ao gerenciamento dos resíduos sólidos, que poderiam firmar convênios com empresas para poder implementar diversos projetos de melhoria ambiental, bem como realizar a fiscalização dos projetos propostos.

No ano de 2011 o empreendimento foi encerrado e teve que ser restaurado ambientalmente, para ter algumas das características fisiográficas originais da área. O recobrimento dos resíduos com solo e o plantio de gramíneas foram alguns dos processos utilizados (FIGURA 2).

Todo resíduo gerado na cidade de Lavras do Sul, e possivelmente em outros municípios da região, são geridos, coletados e dispostos pela empresa responsável que é o Centro de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Caturrita, na cidade de Santa Maria – RS, que é um aterro compartilhado da região. Grande parte dos municípios gaúchos, cerca de 79%, possuem seus serviços de coleta/transporte/destinação final através de parcerias entre a prefeitura e entidades privadas (FEPAM, 2014).

Ao chegar à área de estudo, foi possível observar bem demarcado seus limites como é possível visualizar na Figura 2 (B e C). Porém, ao caminhar sobre a área a fim de conhecer suas características, foi observado que nos taludes do lixão há a presença de resíduos sólidos dos mais variados tipos, além da percolação e exumação de provavelmente lixiviado, oriundo da infiltração das águas pluviais (FIGURAS 3 e 4).

Figura 2 - Mosaico de fotos que mostra três visões do lixão. (A) Foto com visada para o sul e delimitação do lixão a oeste. (B) Foto com visada para noroeste. Note a presença de um desnível acentuado que vai da parte central do lixão para o limite inferior a sudeste, além da presença de resíduos aflorantes nos taludes do lixão. (C) Foto com visada para nordeste. Note a presença de uma vala que separa a área do lixão com a área mais ao sul. Nessa vala há a presença de resíduos aflorantes e serve como um caminho para as águas pluviais e consequentemente poluição do rio próximo.

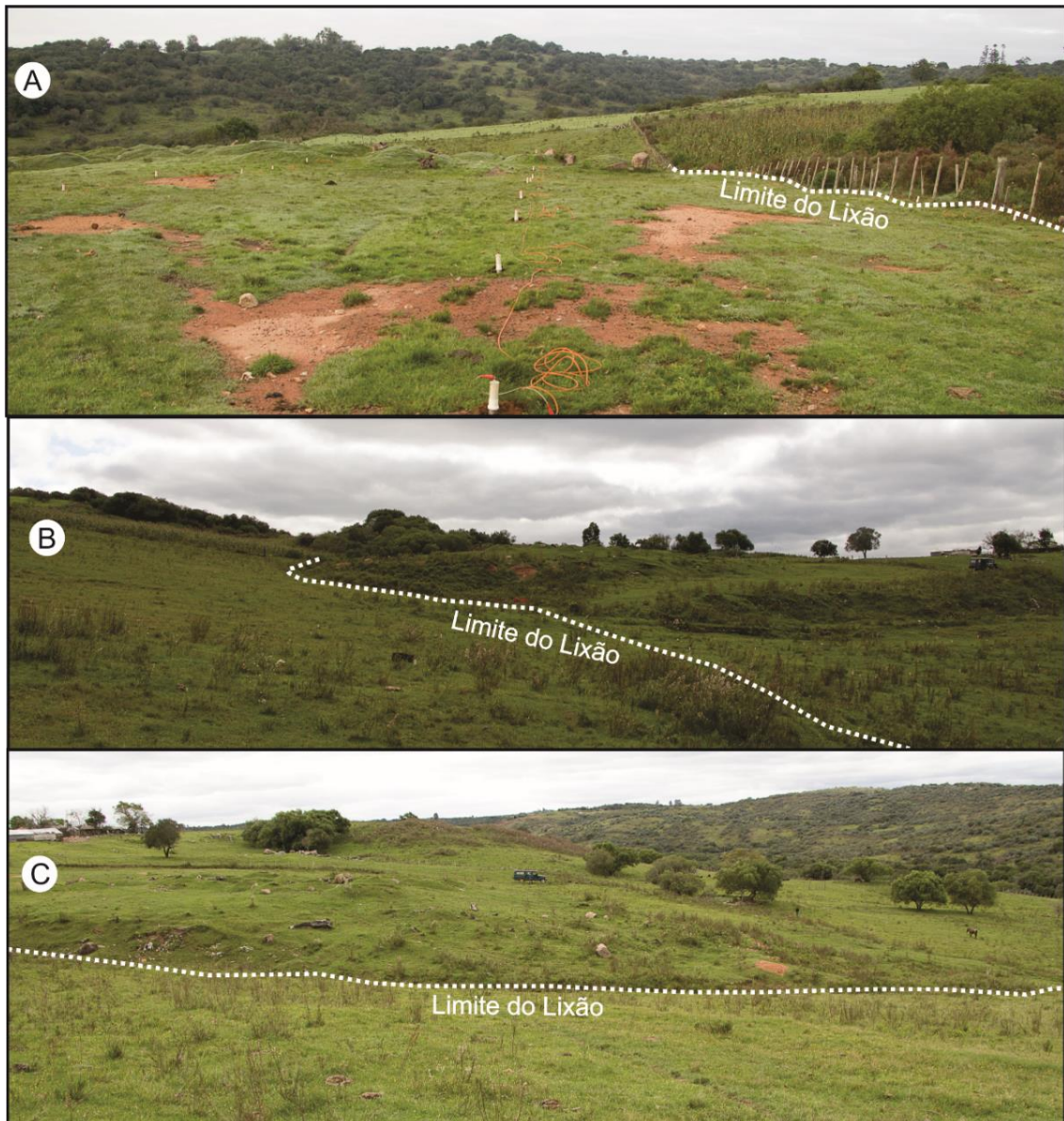


Figura 3 - Mosaico de fotos que evidencia a presença de resíduos aflorantes e sua forma de escoamento e percolação pelo solo. (A) Visada a noroeste do lixão com evidência de locais aflorantes de resíduos. (B) Foto do afloramento de resíduos e caminhos preferenciais para a percolação do lixiviado pelo terreno. (C) Foto do afloramento de resíduos onde foi constatado através do campo o fluxo de lixiviado entre os resíduos, além dos caminhos de percolação e acúmulo do lixiviado.

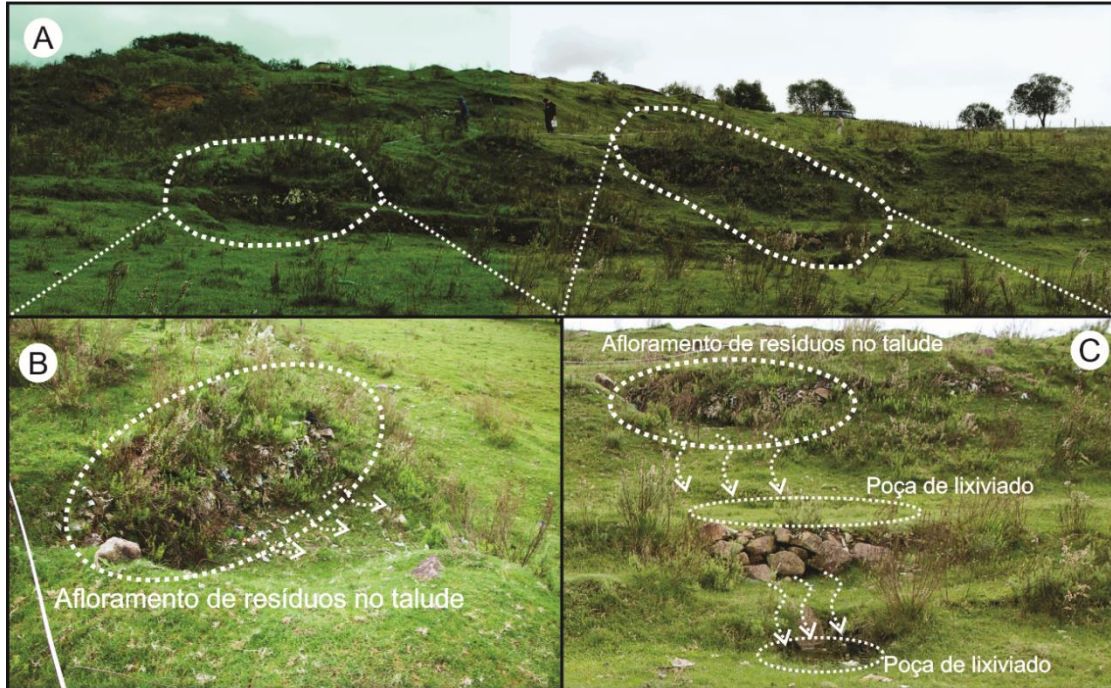


Figura 4 - Foto da porção a sudeste, fora dos limites do lixão, onde o terreno é abaixo da cota dos resíduos. Note a presença de poças de lixiviado que seguem fluxo para um córrego afluente do rio Camaquã das Lavras.



### 3.2 Fisiografia

De acordo com a classificação climática de Köppen (1931), que utiliza aspectos da geografia, climatologia e ecologia para a classificação global dos tipos climáticos, ao considerar que a área de estudo em Lavras do Sul, no inverno possui temperaturas baixas e elevada umidade, enquanto no verão possui temperaturas altas e baixa umidade, é classificado como Cfa (clima temperado úmido com verão quente) (ALVARES et al., 2013). Isto é, o inverno é frio e chuvoso, enquanto o verão é quente e seco.

A região centro sul do estado do Rio Grande do Sul é denominado como Planalto Sulriograndense e está inserido no contexto geológico do Escudo Cristalino Sulriograndense (ESRG). Sua geomorfologia é predominante de morros arredondados e não ultrapassa 300 metros de altitude: é nesse contexto que a área de estudo se encaixa. Nas partes mais altas, os morros são maiores e menos arredondados, geralmente agrupados, que formam as denominadas Serras do Sudeste, que passa por Caçapava do Sul, Encruzilhada do Sul, entre outras cidades (Suertegaray et al., 2004).

O solo presente na área não possui atributos diagnósticos que caracterizam os processos pedogenéticos, pouco espesso e em via de formação, caracterizado assim como um Neossolo Litólico distrófico, pois é constituído em sua maioria por material mineral ou orgânico pouco espesso. Não apresenta uma grande modificação em relação à rocha sã, devido à maior resistência da rocha ao intemperismo, composição mineralógica, fatores de formação como clima, relevo ou tempo, o que limita a evolução pedológica (EMBRAPA, 2006).

O solo possui a presença de blocos e matacões a profundidade irregular do substrato rochoso. Possui textura média, com predominância de fragmentos na fração areia (quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, entre outros), e pode também possuir fração argila devido à alteração do plagioclásio. Por ser um solo pouco espesso e de textura média, a drenagem é alta, no qual a infiltração e percolação das águas pluviais ocorrem rapidamente. Há porções do solo na área de estudo que são relativamente férteis devido ao enriquecimento de bases, oriundas do intemperismo do substrato rochoso (CPRM, 2006).

A região de estudos está inserida no bioma Pampa. É um bioma que possui extrema importância pelo seu patrimônio cultural associado, sua biodiversidade, geomorfologia e geologia. Pode ser caracterizado como extensas terras planas com vegetação predominantemente rasteiras a até uma vegetação decidual mais desenvolvidas em algumas áreas. Seu uso e ocupação dos solos são efetuados de forma desenfreada, com as atividades de pastoreio nos campos planos do pampa, além da inserção da monocultura de pinho, que ameaçam as espécies endêmicas. Por ser um bioma antigo, possui fauna e flora próprias bem desenvolvidas, com cerca de mais de 3000 espécies de plantas, que variam de gramíneas a uma vegetação decidual como as araucárias; sua fauna é bem diversificada, com mais de 700 espécies de vertebrados identificados, sendo a grande maioria aves (BRASIL, 2009).

A área de estudo está localizada nos limites de transição do bioma pampa, pois sua geomorfologia, apesar de apresentar morros de até 300 m de altura, apresenta locais com alta declividade e pouco aplainadas. Seu uso principal atualmente é para as atividades de pastoreio.

Algo a ser destacado com relação a área de estudo é sua inclinação de 8,33% e proximidade de 240 m do Rio Camaquã das Lavras, o que leva a crer que tanto os resíduos sólidos quanto os contaminantes oriundos do lixão, podem ter chegado até o rio e conseqüentemente contaminando-o.

### **3.3 Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã e Hidrogeologia**

De acordo com dados da Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Sul – SEMA (2017) e do Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do rio Camaquã (2017), a bacia hidrográfica do Rio Camaquã está localizada na região central do estado, que abrange as províncias geomorfológicas do ESRG e da Planície Costeira, quando desemboca na Laguna dos Patos. Possui cerca de 21.623,15 km<sup>2</sup> em toda sua abrangência territorial, com um contingente populacional de aproximadamente 250.000 habitantes, distribuídos em 29 municípios. Suas nascentes estão localizadas nos municípios de Dom Pedrito e Lavras do Sul. A água da bacia é destinada a irrigação de culturas como soja/arroz, além do seu uso para animais e abastecimento público.

Após uma análise temporal de chuvas e vazões da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã, de um período de 27 anos (de 1977 a 2004), Baggiotto et al. (2012) constataram que o regime de chuvas é homogêneo (não há uma grande variação) e que as chuvas e vazões mostraram uma tendência de aumento em seus volumes a partir de 1990, mas nada destoante dos dados analisados.

Dos recursos hídricos de subsuperfície na cidade de Lavras do Sul, a área de estudo está inserida no domínio hidrogeológico cristalino, de acordo com o “Projeto SIG de Disponibilidade Hídrica – Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil”, realizado pela CPRM (2007), além do Projeto do Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, realizado pela CPRM (2005).

Esse domínio corresponde às áreas do embasamento cristalino no ESRG, que varia de rochas graníticas, gnáissicas, filitos, xistos, mármore, andesitos, que tenham sofrido processos de faturamento e/ou falhamentos. Normalmente poços nesse domínio hidrogeológico apresentam baixas vazões (2,95 m<sup>3</sup>/h em Pantano Grande, 4,6 m<sup>3</sup>/h em Bagé e 1,95 m<sup>3</sup>/h em Caçapava do Sul) e capacidades específicas inferiores a 0,5 m<sup>3</sup>/h/m, em função da falta de circulação (CPRM, 2005).

Por estar em contato direto com rochas ígneas e metamórficas as salinidades das águas desse tipo de aquífero fraturado são pouco maiores do que as águas dos aquíferos sedimentares que, quando não estão em contato com sedimentos marinhos, ficam inferiores a 300 mg/l. Poços em rochas graníticas, como o caso do Complexo Intrusivo de Lavras do Sul, podem apresentar um enriquecimento em flúor, devido ao contato direto com a rocha (CPRM, 2005).

### **3.4 Geologia Regional**

O Escudo Cristalino Sulriograndense (ESRG) é composto por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares pré-cambrianas, cujas formações estão relacionadas aos ciclos orogênicos, Transamazônico (Paleoproterozóico) e Brasileiro (Neoproterozóico). Porém foi no Neoproterozóico, desde o Toniano até o Eo-Ordoviciano (930 M.a. – 480 M.a.) (CPRM, 2003), que essa área sofreu processos de retrabalhamento crustal e acreção, que de acordo com

Fragoso-César (1991) é denominado como Cinturão Dom Feliciano e pela CPRM (2003) como Sistema Dom Feliciano.

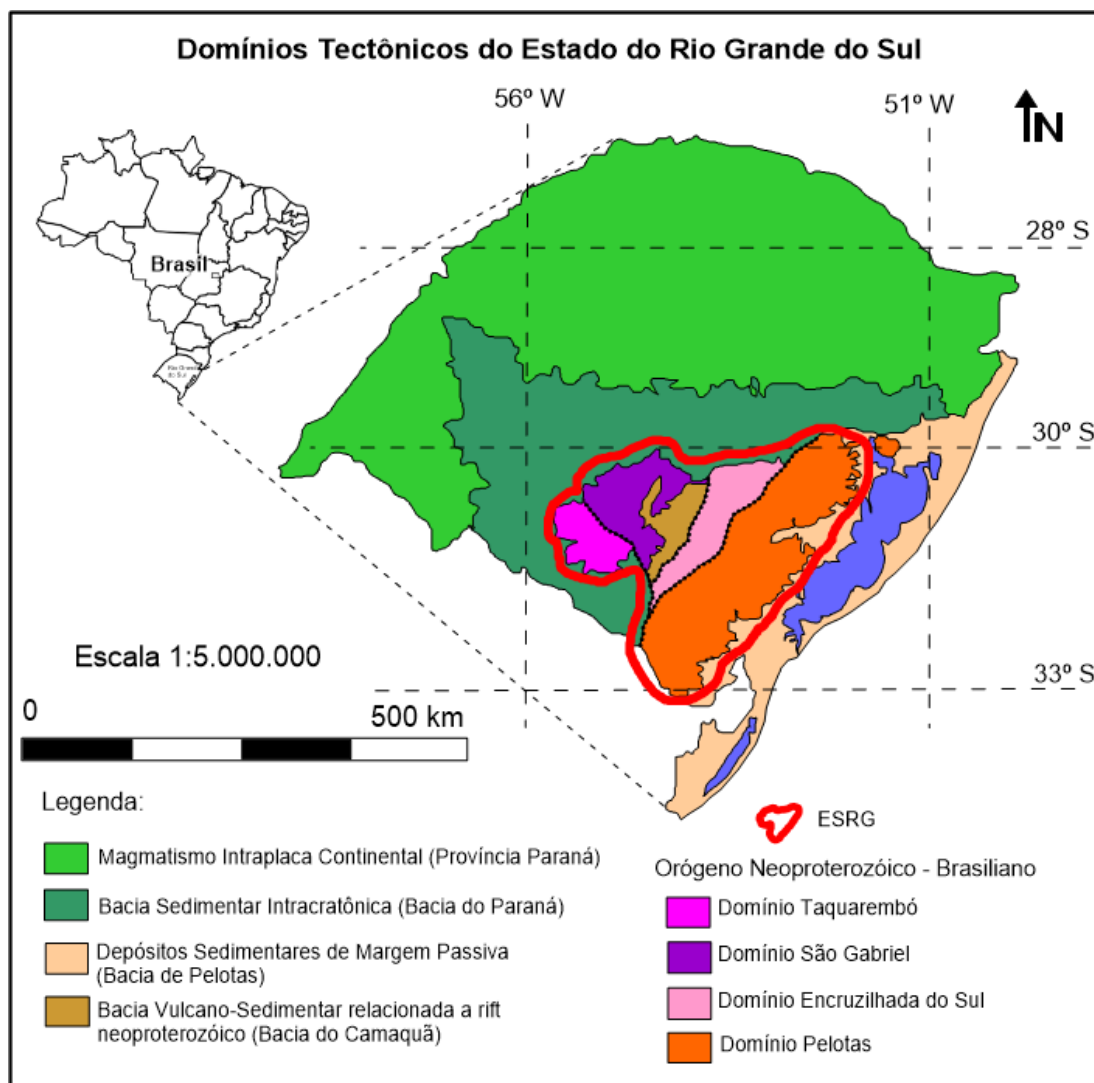
Um dos fatores que ainda não é consenso entre os pesquisadores, é com relação a denominação dos terrenos que compõe o ESRG, que pode ser observado nos trabalhos de Chemale Jr. et al. (1995), Chemale Jr. (2000), Borba et al. (2003), Raposo & Gastal (2009), Gastal et al. (2015). Foi adotado nesse trabalho a nomenclatura presente no Mapa Geológico do Rio Grande do Sul (CPRM, 2008).

Desse modo é possível dividir o ESRG em quatro domínios: Domínio Taquarembó, Domínio São Gabriel, Domínio Encruzilhada do Sul e Domínio Pelotas (FIGURA 5).

O Domínio Taquarembó possui idade paleoproterozóica e esse representa um fragmento do Cráton Rio de La Plata (HARTMANN et al., 2000), que está situado ao sul do Lineamento Ibaré. A unidade principal desse domínio é o Complexo Granulítico Santa Maria Chico, composto por granulitos ácidos e básicos, trondhjemitos, tonalitos ácidos, além de anortositos, granada silimanita gnaiss e lherzolitos. Hartmann et al. (1999) fizeram datações em zircões pelo método U-Pb SHRIMP, com idades magmáticas para os protólitos de 2,55 G.a. e 2,35 G.a., e idade de metamorfismo regional granulítico do Complexo Santa Maria Chico em 2,02 G.a.

A área de estudo está localizada no Domínio São Gabriel, situado ao norte do Lineamento Ibaré e é o único terreno Neoproterozóico de assinatura juvenil no ESRG (BORBA, 2006). É nesse domínio que ocorrem rochas do Complexo Cambaí (gnaisses e granitoides de composição tonalítica-trondhjemítica-granodiorítica (LEITE et al. 1998)), Complexo Metamórfico Vacacaí (com rochas metavulcânicas, metassedimentares e anfibolitos (CHEMALE, Jr., 2000)). Além da Associação Shoshonítica Lavras do Sul ( que seria o magmatismo relatado do Ciclo Brasileiro Neoproterozóico, composto por tonalitos cálcio-alcálicos e trondhjemitos, granitoides com alto teor de potássio e rochas metavulcânicas com sucessão de magmatismo básico a ácido, com afinidade shoshonítica). Eventualmente no período pós-orogênico ocorreu um magmatismo alcalino e intrusão de granitos e sienitos com idades de 600 M.a. (BABINSKI et al., 1996).

Figura 5 - Mapa dos domínios tectônicos do Estado do Rio Grande do Sul, com ênfase para o Escudo Cristalino Sulriograndense.



Fonte: Modificado de CPRM (2008).

O Domínio Encruzilhada do Sul está localizado na porção central do ESRG, possui continuidade em Santa Catarina como Complexo Metamórfico Brusque e no Uruguai como Grupo Lavalleja. De acordo com Chemale Jr. (2000), esse domínio é dividido em unidades geológicas distintas. O Complexo Encantas, são as rochas mais antigas deste domínio, e compreendem rochas granito-gnáissicas e anfibolíticas de idades 2,27 G.a. e 2,16 G.a. através de datação Rb-Sr (SOLIANI JR., 1986). O Complexo Porongos são rochas metamórficas supracrustais e plutônicas de vulcanismo cálcio-alcalino. A Bacia do Camaquã, formada em ambiente molássico, depositada em ambiente dúctil-

rúptil, no Ediacarano. Por fim, rochas graníticas geradas e deformadas entre 595 M.a. e 543 M.a.

O Domínio Pelotas é constituído por rochas graníticas relacionadas aos estágios colisionais e pós colisionais do Ciclo Brasileiro (FRANTZ et al., 2003). As rochas intrusivas foram datadas e possuem idades que variam entre 658 M.a. e 625 M.a. no regime transpressivo e de 625 M.a. e 600 M.a. no regime transtrativo (BORBA, 2006). Nos corpos intrusivos mais antigos (Suítes Erval, Viamão e Encruzilhada do Sul), possuem xenólitos de orto- e paragneisses, anfíbolitos, metapelitos e mármore (PHILLIPP & MACHADO, 2002)

### **3.5 Geologia Local**

O Complexo Granítico de Lavras do Sul (CGL), foi caracterizado por Nardi (1984) como um núcleo monzogranítico a granodiorítico designado na zona central, de afinidade geoquímica shoshonítica. Mais ao sul, oeste e norte da porção central estão parcialmente assimilados por magmas graníticos alcalinos. Deste processo, teriam sido formadas rochas híbridas de características transicionais entre os dois tipos, devido as suas características químicas e petrográficas (NARDI, 1984).

Com os monzogranitos, monzonitos e quartzo monzonitos, que ocorrem ao norte e adicionados na geologia local por Gastal & Lafon (1998), o CGL teve suas fácies graníticas reinterpretadas e seu nome mudado para Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS)

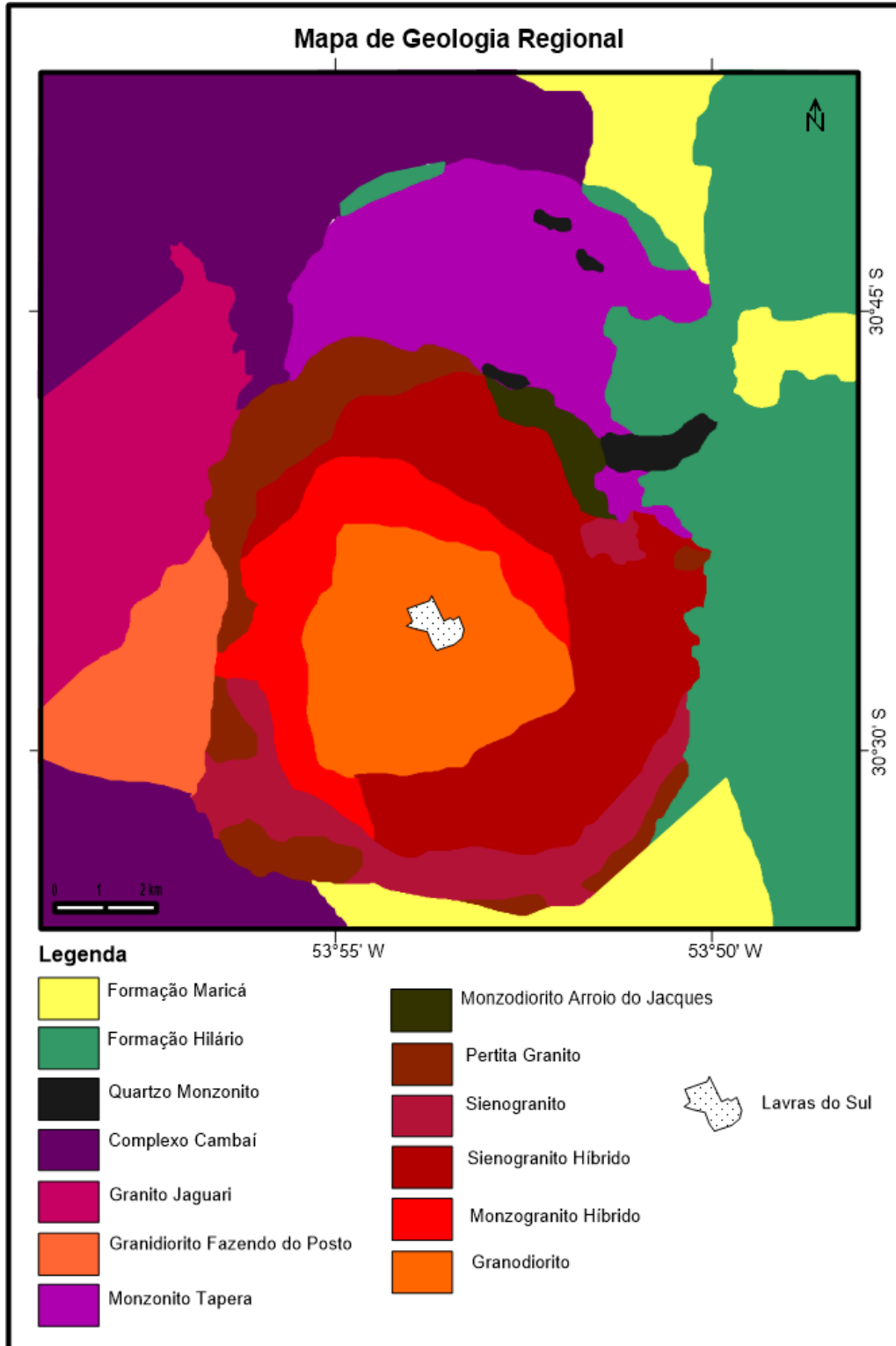
O CILS possui um corpo alongado na direção N-S de tamanho aproximado 10 km x 16 km, que inclui o monzonito Tapera ao norte e o granito Lavras ao sul (FIGURA 6).

O monzonito Tapera consiste em rochas dioríticas e monzodioríticas, quartzo monzonítico porfirítico em pequenos *stocks*, além do monzodiorito Arroio do Jacques entre o monzonito Tapera e granito Lavras (GASTAL et al., 2015).

O granito Lavras está localizado na porção central do CILS e possui forma arredondada de aproximadamente 12 km x 10 km, intrude granitoides a oeste-sudoeste (granodiorito Fazenda do Posto e seccionado ao granito Jaguari), intrude porções das formações Hilário (leste) e Maricá (sul-sudeste).

O granito apresenta minerais preferencialmente magnesianos ao centro e ferrosos nas bordas, que indica zonação composicional reversa.

Figura 6 - Mapa da geologia local da região de Lavras do Sul.



Fonte: Modificado de Raposo & Gastal (2009).

Os termos centrais do granito Lavras são biotita granodiorito (601 M.a. +/- 2.2 M.a.) circundados por hornblenda-biotita monzogranito que grada para hornblenda-biotita sienogranito (604 M.a. +/- 2.2 M.a.) que representam os tipos com geoquímica híbrida; e os biotita-hornblenda sienogranito (586 +/- 2.8 M.a.) compreendem as rochas da borda do granito Lavras. Seus contatos podem ser gradativos ou bruscos, a granulação em todos os tipos varia de grossa a média, entretanto no granodiorito a fácies dominante varia de porfirítica grossa a fina, como é possível observar na Figura 7 (RAPOSO & GASTAL, 2009; GASTAL et al., 2015).

Figura 7 – Amostra do Monzogranito Híbrido, com textura porfirítica grossa com fenocristais de feldspato potássico.



O granito Lavras e a sequência vulcânica próxima são muito estudados devido à sua riqueza em concentrações de ouro. O minério consiste de pirita aurífera e Au livre subordinado, associados a blenda, veios de quartzo e disseminado, varia do tipo pórfiro no granito a epitermal na sequência vulcânica. Ambos os locais possuem controle estrutural parecido, segue direções preferenciais WNW-ESE a ENE-WSW e N50-60°W (sinistral) com variações localizadas (N40-70°E dextral e N20-30°W) (GASTAL et al., 2015).

## 4. RESÍDUOS SÓLIDOS

### 4.1 Definição e Classificação dos Resíduos Sólidos

Resíduos sólidos são definidos como qualquer material ou bem descartado, que tenha sido resultante de atividades antrópicas, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Estes devem ter uma destinação adequada, esteja nos estados sólidos, semissólido, líquido ou gasoso, e necessitam de soluções técnicas para sua disposição adequada, ou que seja economicamente viável de acordo com a melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com a NBR 10.004/2004, os resíduos sólidos são “os restos de atividades antrópicas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, desde que não seja passível de tratamento convencional”.

Porém, nem todos os resíduos possuem características e propriedades semelhantes, por isso é necessária sua classificação para poder fazer a escolha do melhor método de tratamento ou gerenciamento/disposição adequada. Logo a NBR 10.004/2004 classifica de três maneiras, com relação aos potenciais riscos de contaminação ao meio ambiente:

- **Classe I (Perigosos):** São resíduos que possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Apresentam riscos à saúde pública ou podem provocar efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada. Exemplo: graxas e óleos, líquidos corrosivos, inflamáveis, reativos, que possuam reatividade, materiais inorgânicos com toxicidade, e materiais patogênicos;

- **Classe II (Não-inertes):** São resíduos que podem apresentar combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Exemplo: materiais orgânicos, limalhas de ferro, latas de alumínio, fibra de vidro, e efluentes (que podem ser destinados a tratamento biológico);

- **Classe III (Inertes):** São resíduos que não apresentam características que ofereçam riscos à saúde pública e ao meio ambiente e não possuem constituintes que possam serem solubilizados na água e que excedam aos padrões de potabilidade. Exemplo: madeira, entulho, sucata de ferro, vidros.

Com relação à área de estudo, a maioria dos resíduos que foram gerados são de Classe II e III, pois grande parte é constituída de matéria orgânica oriundo dos moradores da cidade. Por não haver nenhuma indústria na cidade, resíduos de Classe I não foram gerados, exceto exceto os gerados em ambientes hospitalares e consultórios veterinários. Por não haver, até hoje, nenhum programa de reciclagem na cidade, todo material que poderia ser utilizado novamente foi para o lixão e atualmente vai diretamente, sem um processo de triagem, para o Centro de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Caturrita.

## **4.2 Formas de Disposição Final dos Resíduos Sólidos**

### **4.2.1 Lixão**

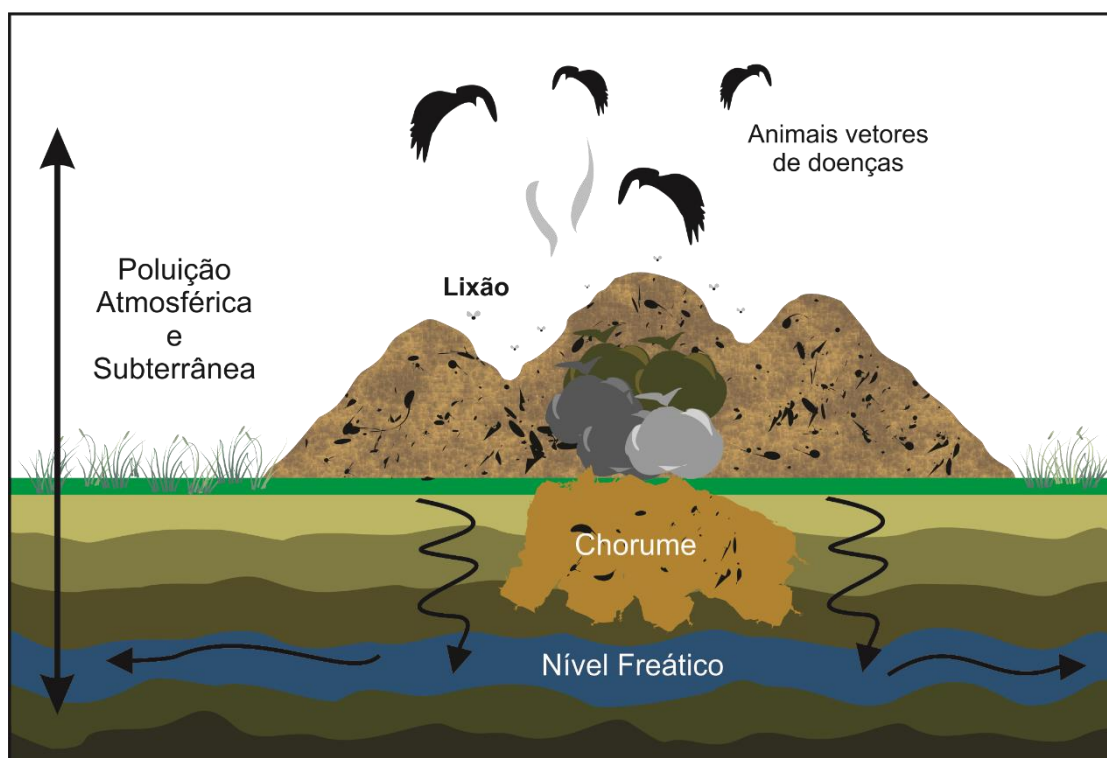
Os lixões ou aterros comuns, são uma forma de disposição final dos resíduos sólidos, lançados sobre os solos sem nenhuma medida preventiva de poluição e contaminação do meio ambiente e/ou saúde pública. Não há nenhum tipo de controle sobre o volume ou a periculosidade dos resíduos dispostos, o que aumenta ainda mais os riscos ambientais (FIGURA 8). É uma forma que propicia o aparecimento de animais, vetores de doenças ao ser humano, geração de odores e conseqüentemente a contaminação do solo, águas superficiais e subterrâneas (NASCIMENTO, 2007)

Antes da Resolução CONAMA 001/86, não havia nenhuma lei específica para a disposição final dos resíduos sólidos. A partir de 1989, com a criação das leis federais 7.754/1989 (revogada pela lei 12.651/2012), 7.802/1989 e 7.803/1989, que estabeleciam medidas preventivas da preservação da fauna e flora, além dos recursos hídricos superficiais, nos mais diversos empreendimentos. Estas leis não foram suficientes para conseguir sanar os

problemas da disposição final dos resíduos sólidos, que eram feitos em lixões a céu aberto

Foi após a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei federal 12.305/10, que previa o encerramento e recuperação ambiental dos lixões até 2014. Porém esse prazo foi prorrogado até 2021, devido a falta de investimentos no setor. Muito foi feito para sanar esse problema, porém, esse tipo de empreendimento ainda não foi extinto e continua sendo recorrentemente usado, principalmente por pequenos municípios de menor poder aquisitivo e pela população em geral que não tem cobertura da coleta domiciliar dos resíduos sólidos, que depositam seus resíduos gerados em terrenos abandonados, os quais tornam-se pontos de referências para outras pessoas atuarem da mesma forma.

Figura 8 - Modelo esquemático de como é a disposição de resíduos sólidos de um lixão e sua interação com o substrato geológico.



Fonte: Adaptado do site EcoD (2010): <http://www.ecodesenvolvimento.org/>

Como este tipo de empreendimento não dispõe de nenhum cuidado de caráter técnico, os líquidos gerados durante a decomposição dos resíduos sólidos são dispersos para águas superficiais, infiltram no solo e atinge as

águas subterrâneas, e as tornam impróprias para consumo humano. Isto ocorre principalmente pela variação das características químicas do lixiviado, que contém elementos tóxicos para o homem (RODRIGUES, 2004) e modificam as propriedades de potabilidade da água, como no caso estudado por Nóbrega et al. (2008) no Lixão do Roger na cidade de João Pessoa - PB, onde foi constatado que o lixão era responsável pela alteração hidroquímica das águas subterrâneas, que excedem limites biológicos e físico-químicos de potabilidade da água para consumo humano.

De acordo com uma notícia vinculada pelo jornal Estadão no ano de 2015, que foi baseada em um estudo da International Solid Waste Association (ISWA) em parceria com a Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), há diversos custos, ambientais e sociais, em manter os lixões aberto. Cerca de 4 bilhões de pessoas no mundo sofrem com o modo de destinação final dos resíduos sólidos. Apenas para o Brasil, o custo por manter os lixões abertos e em operação, entre 2012 e 2016, foi estimado em cerca de US\$ 3,2 bilhões a US\$ 4,65 bilhões, valor suficiente para o Brasil encerrar essa atividade e modernizar seu sistema de gestão de resíduos sólidos (ESTADÃO, 2015).

A área de estudo está inserida nesse tipo de empreendimento, extremamente danoso ao meio ambiente, que foi adequada somente em 2005. Por ser o reaproveitamento de uma antiga pedreira de granito, o cuidado técnico para seu preenchimento foi praticamente nulo. Por ser uma área que possui declividade relativamente acentuada em direção ao rio Camaquã das Lavras, possivelmente muitos resíduos sólidos e contaminantes do lixão atingiram o rio. Sua adequação para um aterro controlado não resolveu de fato o problema da contaminação, pois foi feita apenas uma cobertura com camada de argila sobre os resíduos antigos e posteriormente coberturas diárias. Porém, processos geotécnicos de recalque podem ocorrer em aterros, ocasionando aberturas na camada de argila e possível infiltração do contaminante e águas pluviais.

## **4.3 Produtos da Decomposição dos Resíduos Sólidos**

### **4.3.1 Biogás**

A formação do biogás ocorre quando a matéria orgânica de algum resíduo é coberto ou fica em um ambiente livre de oxigênio. É uma mistura de metano com dióxido de carbono e pode conter traço de outros gases (ABBASI, TAUSEEF & ABBASI, 2011).

A geração do biogás envolve a digestão anaeróbica da matéria orgânica, por bactérias de fermentação que estejam presentes nos resíduos orgânicos e que estejam em um ambiente redutor. A fermentação quebra o complexo orgânico e ocorre em 4 estágios: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese (REDDY, 2011).

Diversos fatores influenciam a formação do biogás, como a proporção de carbono e nitrogênio nos resíduos, diluição, pH, tempo de retenção, toxicidade, agitação, componentes biológicos patogênicos, temperatura e umidade (ABBASI, TAUSEEF & ABBASI, 2011; DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2011).

O gás gerado por um aterro sanitário pode e deve ser usado para a geração de energia, uma vez que possui determinada quantidade de gás combustível (metano). Esta aplicação do biogás retrata um importante reforço ao setor energético e evita a liberação de quantidade significativa de gases agravantes do efeito estufa (REDDY, 2011).

Além do gás metano gerado no processo de decomposição do material orgânico dos resíduos sólidos, outros gases são gerados, tais como monóxido de carbono (CO), compostos nitrogenados, amônia (NH<sub>3</sub>), gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), gases clorados, fluoretados e halogenados em menor quantidade. O H<sub>2</sub>S é importante para o estudo, possui uma taxa de produção que depende de diversos fatores como a composição do resíduo e seu tipo, além de fatores ambientais. Pode representar cerca de 0,2% a 0,3% do volume de gás gerado (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2011). Sua importância é devido a liberação de enxofre para o ambiente, responsável pela cristalização de sulfetos metálicos no lixão.

No Brasil, o emprego desse recurso ainda é considerado incipiente, em vista das condições climáticas favoráveis, enquanto a Alemanha é destaque

mundial como o país líder no aproveitamento energético de biogás (ICLEI, 2009).

#### **4.3.2 Chorume**

Os aterros sanitários recebem majoritariamente resíduos sólidos de fontes domésticas e comerciais, que geralmente apresentam composição de materiais variados como restos de alimentos, embalagens, tecidos, papéis, metais, entulhos de construção civil e resíduos urbanos (CHRISTENSEN, 2011). Ainda, Zanta et al. (2006) afirma que é possível encontrar contaminantes químicos e biológicos, como inseticidas, cosméticos, produtos de higiene pessoal, curativos e latas de tinta.

O produto gerado da degradação desses resíduos é denominado de chorume, que pode ser dividido em quatro frações: matéria orgânica dissolvida, compostos orgânicos xenobióticos, macropoluentes inorgânicos e metais com potencial de toxicidade. O chorume é caracterizado como um líquido de cor escura, que apresenta odor ocre, e pode conter substâncias tóxicas com elevada mobilidade, como o cloreto, ferro e zinco (MORAIS et al., 2006). Seu pH tende a ficar alcalino com o tempo e sua carga orgânica diminuir (ISWA, 2015). Sua composição pode variar com o tipo do resíduo, com a idade dos resíduos no aterro, com a capacidade de infiltração das águas pluviais e as técnicas de construção do aterro. Isso interfere na composição e concentração do chorume gerado (HUNG, WANG & SHAMMAS, 2012).

A taxa da produção também varia principalmente com a quantidade de água presente nos resíduos e ao processo de decomposição por bactérias durante as fases aeróbicas e anaeróbicas, através da dissolução da matéria orgânica e a formação do chorume. A profundidade dos resíduos está atrelada à oxigenação dos mesmos. Próximos à superfície há uma maior presença de oxigênio e a decomposição da matéria orgânica é mais rápida. Em maiores profundidades, a presença do oxigênio é menor e as bactérias anaeróbicas irão degradar os resíduos, que pode levar um período maior para completar o processo.

A mudança característica nas concentrações de chorume em função do tempo de degradação da massa de resíduos pode ser visualizada na Tabela 1,

baseada nos trabalhos de Farquhar (1989) e de Birks & Eyles (1997), os quais analisaram a variação dos parâmetros físicos e químicos e relacionaram com a idade de disposição dos resíduos.

A formação do chorume é contínua, e pode ser acelerada ou retardada por fatores físicos e químicos, principalmente pela água intersticial, pela cobertura, impermeabilização e pelo balanço hídrico. Há outros fatores que interferem na produção do chorume, tais como: potencial de hidrogênio, temperatura, presença de nutrientes, ausência de substâncias tóxicas, grau de compactação e a quantidade e diversidade de microrganismos presentes (GOMES et al., 2006; HUNG, WANG & SHAMMAS, 2012).

Tabela 1 - Mudança característica nas concentrações de chorume com o tempo de disposição dos resíduos no solo.

Parâmetro (mg/L)	Idade do resíduo (anos)			
	0 – 5	5 – 10	10 – 20	> 20
STD*	10000 – 25000	5000 – 10000	2000 – 5000	> 1000
pH	5 – 6	6 – 7	7 – 7,5	7,5
DBO	1000 – 25000	1000 – 4000	50 -100	< 50
DQO	15000 – 40000	10000 – 20000	1000 - 5000	< 1000
Nitrogênio amoniacal	500 – 1500	300 – 500	50 – 200	< 30
Fósforo total	100 – 300	10 – 100	-	< 10
Cloretos	1000 – 3000	500 – 2000	100 – 500	< 1000
Sulfatos	500 – 2000	200 – 1000	50 – 200	< 50
Cálcio	2000 – 4000	500 – 2000	300 – 500	< 500
Sódio + Potássio	2000 – 4000	500 – 15000	100 – 500	< 100
Magnésio + Ferro	500 – 15000	500 – 1000	100 – 500	< 100
Zinco + Alumínio	100 – 200	50 – 100	10 – 50	< 10
Alcalinidade	10000 – 15000	1000 – 6000	500 – 2000	< 500

STD – Sólidos Totais Dissolvidos; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio

Fonte: Adaptado de Farquhar, (1989) e Birks & Eyles (1997).

O chorume não coletado e sem tratamento, percola no solo, e causa problemas ambientais, como a contaminação do solo, das águas superficiais e subsuperficiais, e a alteração da qualidade do ar pela liberação de gases. Sua percolação no solo apresenta deslocamento lento, não uniforme e descontínuo,

varia com as propriedades do solo, principalmente relacionado ao grau de compactação do material utilizado para impermeabilização e a presença de água no sistema (FANG, 1995).

As áreas contaminadas podem ser identificadas e caracterizadas pelos métodos geoeletricos, em termos de anomalias de baixa resistividade elétrica, devido à presença de grande quantidade de íons diluídos no fluido (CETESB, 2001; GALVÃO & PORSANI, 2011; ROCHA & LA TERRA, 2011; CAVALCANTI et. al, 2014).

## 5. ÁGUA SUBTERRÂNEA E AQUÍFEROS

### 5.1 Tipos de Aquífero

Com o aumento da densidade demográfica e mudança nos padrões de consumo, as águas superficiais não são mais suficientes para o abastecimento humano, industrial e agrícola, devido a sua pouca disponibilidade, comparado com outras fontes, e principalmente pela poluição e contaminação da maioria dos recursos hídricos superficiais. Devido a essa má administração dos corpos hídricos superficiais, as águas subterrâneas se tornaram uma fonte de importância crescente a nível mundial, pois de acordo com Veríssimo (1999), as águas subterrâneas possuem características particulares como seu armazenamento, qualidade, potencial quantitativo, controle de oferta e a proximidade da fonte em relação aos locais de demanda. Isso faz das águas subterrâneas serem consideradas um bem mineral de alto valor no mercado e representa cada vez mais uma fonte de abastecimento humano.

As águas subterrâneas são encontradas nos aquíferos, que são corpos rochosos que possuem as características de armazenar e transmitir grandes volumes de água. Podem ser classificados de acordo com a pressão da água nas superfícies delimitadoras do aquífero e em função da sua capacidade de transmitir água através das camadas delimitadoras do aquífero (topo e base) (ALLABY, 2007).

**Aquífero Confinado:** é o aquífero em que a pressão do topo é maior que a pressão atmosférica. A percolação da água ocorre entre dois estratos impermeáveis ou pouco permeáveis. Pode ser dividido entre Não Drenante e Drenante. A diferença entre eles é de que no Não Drenante as camadas limítrofes são impermeáveis e não há a passagem de água para outros corpos rochosos, enquanto no Drenante, ao menos uma parte das camadas limítrofes possui uma certa permeabilidade que permite a entrada ou saída de água por drenança. Apesar das formações semipermeáveis oferecerem uma certa dificuldade para a passagem de água, as quantidades ganhas ou perdidas são consideráveis (FITTS, 2002).

**Aquífero Livre:** também chamado de freático, é formado por rochas e/ou materiais geológicos permeáveis e possui seu limite superior em uma

superfície freática (próxima à superfície do terreno) em que a água é submetida à pressão atmosférica. Possuem sua recarga por infiltração pluviométrica e podem abastecer aquíferos confinados, caso o aquífero livre for drenante. Para ser um aquífero livre drenante a base deve ser de rocha semipermeável, para poder ocorrer a passagem da água pelo aquífero de modo contínuo; do contrário, caso a rocha seja impermeável, o aquífero será não drenante (HISCOCK, 2005).

Aquífero Suspenso: é um caso diferente de aquífero livre que é formado sobre uma camada de material impermeável com uma extensão limitada. Geralmente são de caráter temporário, por estarem situados entre a superfície freática regional e o nível do terreno, somem à medida que drenam para o nível freático abaixo dele (CPRM, 2000)

## **5.2 Aquíferos em Rochas Cristalinas**

As rochas cristalinas possuem poucos ou nenhum poro em sua matriz, portanto sua porosidade e permeabilidade primária são nulas. Entretanto, processos tectônicos e o intemperismo, favorecem a criação de fraturas e falhamentos e do manto de intemperismo, que cria uma porosidade e permeabilidade secundária de grande importância para a ocorrência de água nesse sistema (FETTER, 2000)

O maior problema para a exploração da água subterrânea nesse meio é a locação de poços. Por não haver ideia da presença ou não de fraturas em pontos específicos da rocha, acaba por se criar uma rede de incertezas sobre a locação do poço, que pode ser diminuída através da investigação geológica/geofísica. As pequenas fraturas interconectadas é que são responsáveis pela maior parte da água produzida, mas que não são facilmente detectadas pelas técnicas geofísicas, a não ser que haja um grande contraste entre as fraturas preenchidas e a rocha sã adjacente.

Com o avanço das tecnologias de processamento de imagem e dados geofísicos, junto a uma boa coleta de dados estruturais em campo, auxiliou na diminuição das incertezas. Porém, não há certeza absoluta de onde irá ser perfurado, pois a distribuição das fraturas e sua geometria podem não ser detectadas em campo ou pelos dados coletados indiretamente.

Em meios fraturados, onde há a presença de contaminantes, possivelmente a geofísica irá detectar com mais facilidade uma anomalia, que pode ser o local indicado para a perfuração de um poço de monitoramento da contaminação em que deseja investigar (AHMED et al., 2008).

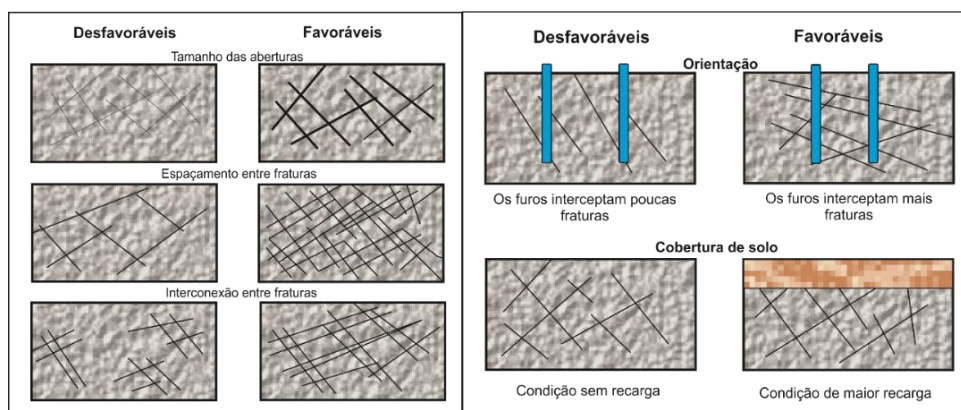
Há diversos fatores que podem influenciar no fluxo de água nas zonas fraturas, mas o fator principal é a disposição das fraturas na rocha, pois são essas características intrínsecas da rocha. No entanto, fatores externos podem ter influência na disponibilidade de água e sua vazão.

Fatores como clima, topografia e formas de relevo são importantes pois, junto com o intemperismo, regem a decomposição da rocha e a espessura do manto intempérico. A presença desta camada intemperizada é importante para realizar a recarga das fraturas.

Outros fatores que influenciam são os litotipos e as discontinuidades, pois rochas com diferentes composições podem resultar em poços com maior produtividade, caso haja discontinuidades de fraturas, planos de acamamento, foliação/clivagem, que podem estender por quilômetros e possuírem conexões entre si, sendo poços com elevada vazão (NEVES, 2005; AHMED et al. 2008).

A disposição das fraturas na rocha e suas características como abertura, ângulo de mergulho e conexão com outras fraturas, além da cobertura do manto intempérico (FIGURA 9) é o que realmente importa para um poço ser produtivo (CPRM, 2000).

Figura 9 - Modelo da disposição das fraturas em rochas cristalinas para a produção de um poço e modelo da disposição dos poços em relação as fraturas e da recarga do aquífero.



Fonte: Modificado de CPRM (2000).

## 6. MATERIAIS E MÉTODOS

### 6.1 Métodos Geoeletricos

Os métodos geofísicos mais utilizados para realizar estudos ambientais são os métodos Elétricos e Eletromagnéticos. Diversos estudos já foram realizados utilizando esses métodos, tais como os trabalhos realizados por Moura & Malagutti Filho (2003), Moreira (2005, 2009), Fachin et al. (2006), Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) (2007), Gandolfo (2007), Silva (2008), Lago (2009), Silva & Malagutti Filho (2009), Saraiva (2010), Bortolin & Malagutti Filho (2010), Gallas et al. (2011), De Carlo et. al (2013), Casado et. al (2015), Bichet et. al (2016), Tildy et. al (2017). Estudos realizados nos mais diversos âmbitos ambientais, como por exemplo cemitérios, aterros de resíduos sólidos, contaminações do solo e águas subterrâneas, entre outros.

O método da Eletrorresistividade tem como base a determinação resistividade elétrica dos materiais em subsuperfície. A heterogeneidade do meio geológico, atua como interface de contraste (descontinuidades elétricas, que possuem diversos valores de resistividade elétrica em uma única seção). Esse método possui rápida obtenção dos dados, fácil de ser usado e proporciona bons resultados (KEAREY et. al, 2002). A resistividade elétrica é uma propriedade física de grande variação, pois depende do tipo de material geológico e pode apresentar valores extremamente baixos (como metais nativos e grafite, que são bons condutores de eletricidade) e valores elevados de minerais que se portam como um 'isolante' (grande parte dos minerais formadores de rochas).

A resistividade elétrica, devidamente medida, processada e inserida em modelos ou seções transversais de resistividade, servem para caracterizar o meio geológico, tais como o grau de alteração, fraturamento, presença de depósitos minerais, águas subterrâneas e contaminantes, e conduz investigações em diferentes profundidades e de forma invasiva.

Para entender as propriedades elétricas dos materiais terrestres, é necessário compreender que a prospecção elétrica é a detecção dos efeitos que são produzidos no subsolo pela passagem da corrente elétrica, no qual é possível realizar a medida de potenciais elétricos, correntes e campos

eletromagnéticos induzidos. A corrente elétrica, quando aplicada ao meio geológico, pode ser propagada de três modos: condução eletrônica, eletrolítica e dielétrica (TELFORD *et al.*, 1990).

- Eletrônica: Esse tipo de condução irá ocorrer quando há a presença de estruturas de minerais homogêneos, com alta concentração de íons presentes (elétrons livres) e elevada mobilidade, como depósitos de sulfetos maciços, grafita e filões minerais.

- Eletrolítica: Irá ocorrer em rochas que possuem poros (primários e/ou secundários), onde há a presença de fluídos ou argilominerais, com concentrações de íons presentes. A propagação da corrente ocorre através da condução iônica pode variar de acordo com a temperatura, valência e mobilidade dos íons presentes. Em rochas porosas a variabilidade da resistividade elétrica vai depender do volume e arranjo dos poros (para rochas sedimentares) ou da quantidade e das propriedades elétricas dos minerais que formam uma rocha (para rochas ígneas), além de fraturas e fluídos.

- Dielétrica: Ocorre em meios com baixa condução elétrica ou isolantes, nos quais não há nenhum elétron livre. Quando uma corrente elétrica externa é aplicada, os elétrons deslocam-se rapidamente do núcleo. Essa separação de cargas iônicas é conhecida como polarização dielétrica, que produz uma corrente de deslocamento.

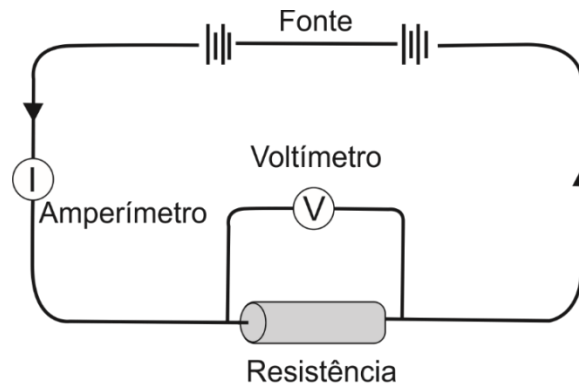
De modo geral, a condução elétrica nas rochas, ocorre essencialmente na forma eletrolítica, pois depende de diversos fatores como a composição mineralógica (minerais metálicos ou argilominerais), a presença de fluídos e sua saturação, presença de poros e fraturas, além da dissolução dos minerais que acarreta o carreamento de íons para os fluídos nos poros/fraturas, que podem variar de acordo com a temperatura da rocha (SHARMA, 2002).

O conceito que rege o método da Eletrorresistividade é que ao aplicar uma diferença de potencial em um material, a corrente resultante será em função da resistência do condutor (FIGURA 10), dada pela equação, que explicita a variação de tensão em um corpo, em função de R e I:

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Equação (1)}$$

R = Resistência Elétrica (Ohms), V = Diferença de potencial elétrico (volts), I = Intensidade da corrente (ampère).

Figura 10 - Esquema da aplicação de uma corrente elétrica em um circuito com um material resistivo.



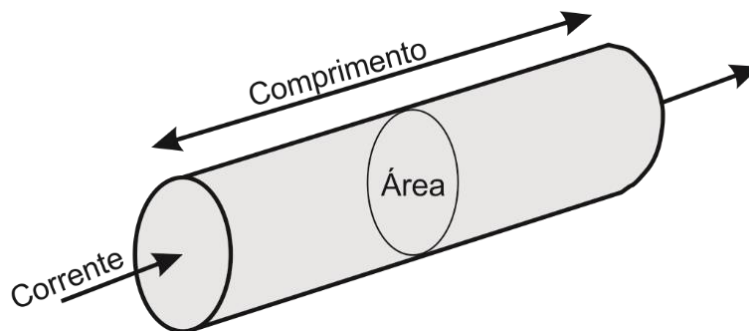
Fonte: Modificado de Musset & Khan (2009)

A equação a seguir mostra como R varia de acordo com as dimensões físicas e do material que constitui o corpo (FIGURA 11):

$$R = \rho \frac{L}{S} \text{ (ohms)} \quad \text{Equação (2)}$$

R = Resistência Elétrica (Ohms), L = Comprimento do condutor (m), S = Seção transversal do condutor (m<sup>2</sup>),  $\rho$  = Resistividade Elétrica (Ohm.m)

Figura 11 - Modelo da passagem da corrente elétrica por um material. A resistência do material vai depender das suas dimensões (comprimento e área).



Fonte: Modificado de Musset & Khan (2009).

Ao isolar  $\rho$  da Equação 2, podemos obter seu valor através da seguinte equação:

$$\rho = R \frac{S}{L} \text{ (ohm.m)} \quad \text{Equação (3)}$$

R = Resistência Elétrica (Ohms), L = Comprimento do condutor (m), S = Seção transversal do condutor (m<sup>2</sup>),  $\rho$  = Resistividade Elétrica (Ohm.m)

Logo, a dimensão da resistividade elétrica é um produto da resistência elétrica do material ao longo de seu corpo. A resistividade é a dificuldade de propagação de uma corrente elétrica em um material, que possui relação as leis elétricas e aos mecanismos de propagação de corrente (KEAREY et. al, 2002).

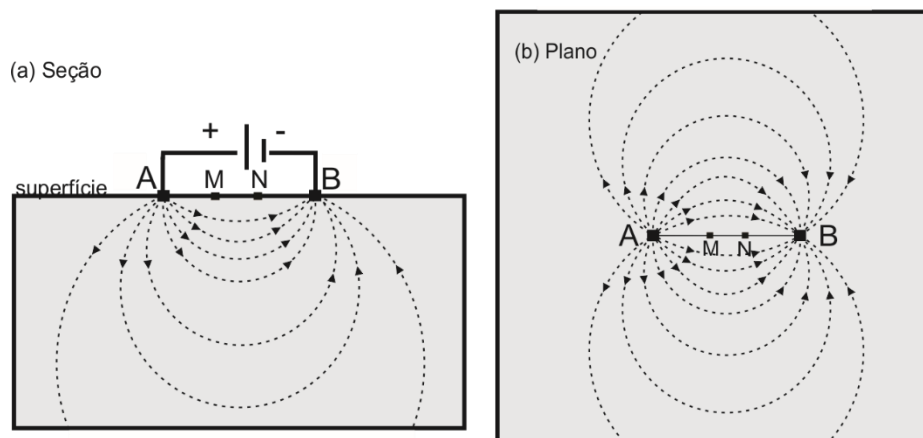
A tensão (ou diferença de potencial) é definida como o trabalho feito pelo campo elétrico  $E$  ao mover uma carga elétrica de prova do infinito até o ponto de leitura  $P$ . A carga elétrica aplicada se propaga de modo tridimensional (FIGURA 12). O potencial elétrico  $V$  a uma distância  $r$  dos eletrodos é dada pela integral de  $E_r$  entre  $r$  e infinito (EVERETT, 2013):

$$V = \int_r^\infty E_r d_r = \int_r^\infty \frac{I\rho}{4\pi r^2} d_r = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad \text{Equação (4)}$$

$V$  = potencial elétrico (volt),  $E$  = campo elétrico (Newton por Coulomb),  $r$  = distância dos eletrodos (m),  $\rho$  = Resistividade Elétrica (Ohm.m)

É essa equação que fornece a relação fundamental para os métodos de prospecção elétrica que são feitas a partir da superfície.

Figura 12 - Esquema da propagação da corrente elétrica no substrato geológico vista em seção (a) e no plano (b).



Fonte: Modificado de Musset & Khan (2009).

No entanto, a corrente elétrica não pode se propagar no meio não condutor que é o ar; logo, ao invés de aplicarmos a área de uma superfície esférica total, aplicamos a área da semi-esfera de raio ( $r$ ) e superfície  $2\pi r^2$ .

Desse modo a tensão (V) pode ser calculada a partir da Equação 5 (SHARMA, 2002, KEAREY et. al, 2002):

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r_p} \quad \text{Equação (5)}$$

V = potencial elétrico (volt), E = campo elétrico (Newton por Coulomb), r = distância dos eletrodos (m),  $\rho$  = Resistividade Elétrica (Ohm.m)

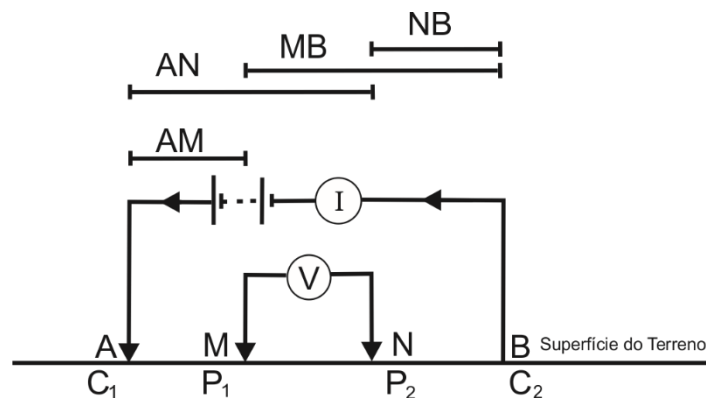
Porém, há a necessidade de considerar que há eletrodos de corrente [A(+I) e B(-I)], que são colocados em um sólido condutor nas posições  $C_1$  e  $C_2$ , e os potenciais resultantes nos pontos de detecção (M e N) são dados por:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{MB}} \right] \quad \text{Equação (6)}$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{NB}} \right] \quad \text{Equação (7)}$$

No qual  $\overline{AM}$  é a distância entre os pontos  $C_1$  e  $P_1$ ,  $\overline{MB}$  é a distância entre os pontos  $C_2$  e  $P_1$ ,  $\overline{AN}$  é a distância entre os pontos  $C_1$  e  $P_2$ ,  $\overline{NB}$  é a distância entre os pontos  $C_2$  e  $P_2$  (Figura 13).

Figura 13 – Relação das distâncias apresentadas entre eletrodos A e B para os eletrodos M e N, para elaboração da equação.



De todo modo, o que é realmente medido e mensurado é a diferença de potencial dos pontos M e N, e não necessariamente apenas o potencial. Logo para um arranjo de quatro eletrodos, teremos:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left[ \frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{MB}} \right] - \left[ \frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{NB}} \right] \right\} \quad \text{Equação (8)}$$

Ao reescrever a Equação (8) em função da resistividade elétrica teremos a resistividade do semi-espaço:

$$\rho = \frac{\Delta V_{MN}}{I} \cdot K \quad \text{Equação (9)}$$

$\rho$  = Resistividade elétrica,  $\Delta V_{MN}$  = Diferença de potencial entre os eletrodos M e N,  $I$  = Intensidade de corrente entre os eletrodos A e B,  $K$  = fator geométrico

O fator geométrico é dependente da geometria do arranjo utilizado, que pode ser calculado através da equação:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{AM}\right] - \left[\frac{1}{MB}\right] - \left[\frac{1}{AN}\right] + \left[\frac{1}{NB}\right]} \quad \text{Equação (10)}$$

Ao substituir  $K$  na equação, tudo se resumirá na seguinte equação:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V_{MN}}{I\left\{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB}\right)\right\}} \text{ (ohm. m)} \quad \text{Equação (11)}$$

$\rho$  = Resistividade elétrica,  $\Delta V_{MN}$  = Diferença de potencial entre os eletrodos M e N,  $I$  = Intensidade de corrente entre os eletrodos A e B.

Como já dito que a heterogeneidade do meio é que demarca as descontinuidades elétricas, a resistividade medida pela Equação (11), sendo a média ponderada da resistividade do meio pelo qual a corrente percorreu, ou então a resistividade aparente  $\rho_a$ . Pois no meio geológico o campo elétrico sofre modificações devido a seus mais diversos componentes, que engloba os solos, rochas, águas subterrâneas e entre outros. Dessa forma os valores de resistividade podem ser diferentes para cada arranjo eletródico que for usado nas medições.

Os valores de resistividade aparente, são tomadas como base para a interpretação da seção levantada, que são interpretadas como anomalias, devido a estratificação geoelétrica do meio investigado. Esse conceito é importante, pois ao longo de uma seção, pode apresentar variações na medida, que indicariam a presença de heterogeneidade elétricas resistivas ou condutivas no meio, que são um diagnóstico da presença de contaminantes, depósitos minerais, etc (GANDOLFO, 2007).

## **6.2 Polarização Induzida**

O método da Polarização Induzida, é um dos métodos mais usados e populares das técnicas geofísicas para a exploração mineral, pelo fato de ser o que tem uma melhor resposta aos minérios disseminados ou de baixo teor. O conceito geral desse método se baseia em uma corrente contínua no meio geológico, e após cessar a corrente de modo abrupto, a diferença de potencial entre os eletrodos de detecção não caem a zero imediatamente: há um decréscimo grande no início; após isso a diferença de potencial sofre um decaimento gradual até atingir zero. Esse fenômeno também ocorre quando a corrente é ligada até estabilizar. Desse modo, o solo age como um capacitor, armazena energia e torna-o eletricamente polarizado (KEAREY et. al, 2002).

A medição do decaimento da diferença de potencial sobre um certo intervalo temporal é conhecida como 'levantamento IP no domínio do tempo', quando a medida for feita através de corrente contínua. Quando é usada corrente variável de baixa frequência, é conhecido como 'levantamento IP no domínio na frequência'. Em geral, a maioria dos trabalhos com IP realizam as medidas após a medição da eletrorresistividade com corrente contínua, então grande parte do levantamento é feito em domínio do tempo.

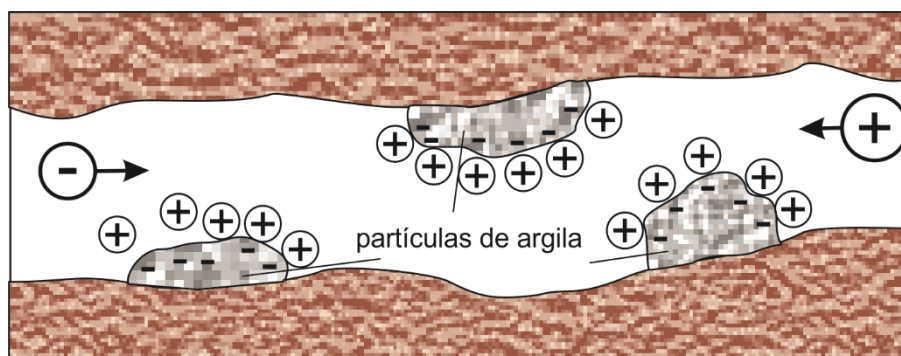
A energia elétrica é armazenada nas rochas por processos eletroquímicos e podem ser realizados de duas maneiras.

### **6.2.1 Polarização de Membrana**

Quando uma tensão é imposta na rocha, a corrente passa pela rocha através de um fluxo eletrolítico nos fluídos dos poros. A maior parte dos minerais formadores de rochas, argilas e outros minerais fibrosos, são carregados negativamente em suas superfícies, e atraem íons positivos dos fluídos, e forma uma dupla camada elétrica (FIGURA 14). Caso um campo elétrico seja aplicado, as nuvens positivas dos íons são distorcidas e os íons negativos moverão para essa direção e ficarão presos de cada lado do bloqueio, produzindo gradientes de concentração que acabam por impedir o fluxo da corrente (MILSOM & ERIKSEN, 2011). Após a tensão ser cessada, uma corrente inversa flui para restaurar o equilíbrio original, que causa um decaimento gradual da diferença de potencial. Esse efeito ocorre

principalmente em minerais de argila, devido ao tamanho dos poros, e tem seu efeito diminuído com o aumento da salinidade dos fluídos dos poros (KEAREY et. al, 2002).

Figura 14 - Esquema de como a presença de partículas de argilominerais atraem os íons dispersos.



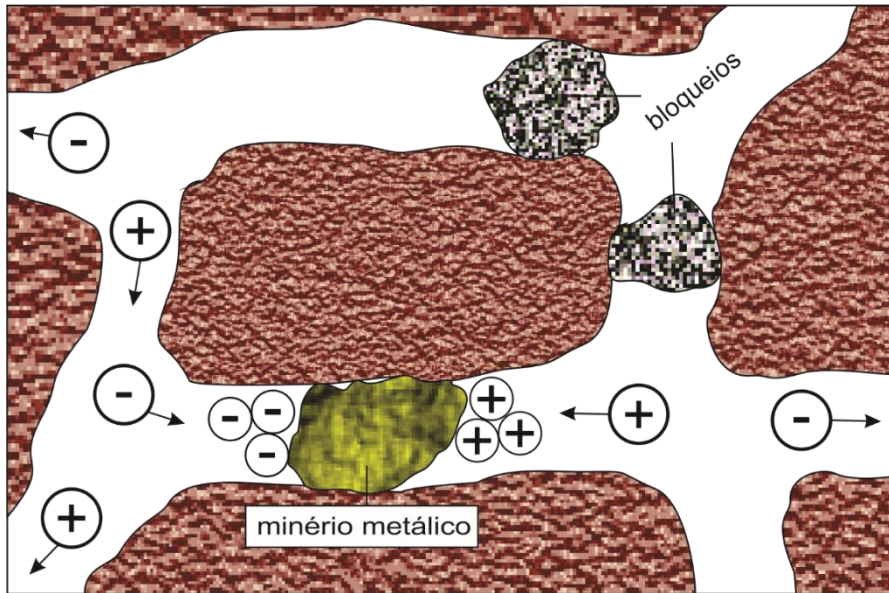
Fonte: Modificado de Musset & Khan (2009)

### 6.2.2 Polarização de Eletrodo

Quando uma tensão é imposta na rocha, que possui minerais metálicos presentes, um caminho alternativo é aberto para o fluxo da corrente. Os íons presentes acumularão em volta do grão mineral, que tendem liberar ou aceitar os elétrons conduzidos através do grão, o que causa um aumento na carga elétrica (FIGURA 15). Quando a corrente é cessada, os íons dispersarão lentamente de volta aos seus locais e causam um decaimento na voltagem (KEAREY et. al, 2002). Essa polarização também ocorre de modo mais eficiente em grãos que estejam em contato com a água subterrânea e possuam uma área de superfície maior, entretanto, também ocorre em superfícies menores, no qual é possível determinar sulfetos disseminados ou maciços (MILSOM & ERIKSEN, 2011).

Assim como a polarização de membrana, o aumento da salinidade e da porosidade na rocha hospedeira do mineral metálico disseminado fazem o efeito diminuir, pois são criados diversos caminhos alternativos para a condução da corrente iônica ser a mais eficiente possível.

Figura 15 - Esquema de como bloqueios dentro dos poros direcionam os íons dispersos e de como um minério metálico atrai esses íons.

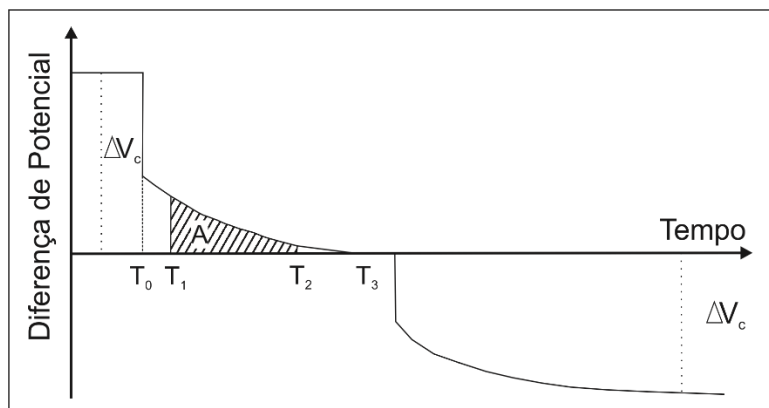


Fonte: Modificado de Musset & Khan (2009).

### 6.2.3 Cargabilidade

A cargabilidade aparente de uma massa de rocha é obtida através do cálculo da área da curva de decaimento, entre o primeiro e último intervalo, como visto na Figura 16. A cargabilidade é definida pelo potencial transiente variável entre dois pontos da curva de decaimento transiente, normalizada pelo potencial primário definido como (Equação 12) (KEAREY et. al, 2002).

Figura 16 – Gráfico de decaimento da corrente em subsuperfície, no qual a cargabilidade é obtida pelo cálculo da área de decaimento  $T_1$  e  $T_2$ .



Fonte: Modificado de Kearey et. al (2002).

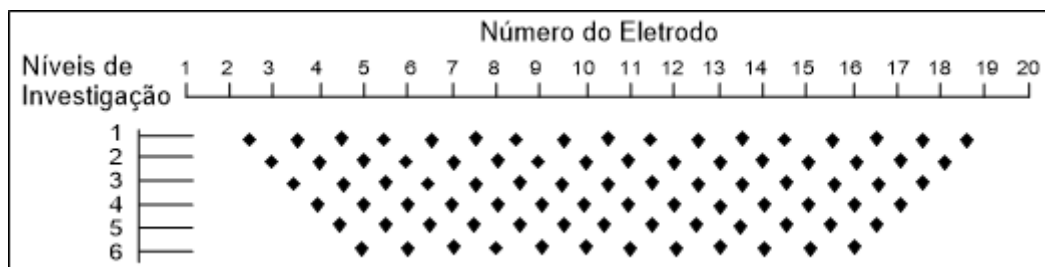
$$M = \frac{A}{\Delta V_c} = \frac{1}{\Delta V_c} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad \text{Equação (12)}$$

### 6.3 Tomografia Elétrica

Muitos são os nomes dados para o mesmo propósito, como Tomografia Elétrica, nome usado principalmente na Europa (MILSOM & ERIKSEN, 2011) e Caminhamento de Separação Constante (KEAREY et. al, 2002). Essa técnica consiste em utilizar arranjos de eletrodos, onde os eletrodos de corrente e os eletrodos de potencial são mantidos a uma separação fixa e movidos ao longo do perfil desejado, para gerar uma seção horizontal de resistividade e/ou cargabilidade por profundidade.

A coleta dos dados é realizada através do valor medido da resistividade elétrica, graficamente representado na intersecção de linhas de 45°, tiradas a partir do ponto médio de cada par de eletrodos, no qual os eletrodos de injeção da corrente são os eletrodos AB e os de potencial MN (FIGURA 17).

Figura 17 – Esquema do perfil de dados obtidos em um levantamento de tomografia elétrica.



Quando os eletrodos são movidos a uma distância igual para a direita, os pontos de intersecção irão mover na mesma distância, sendo obtido valores ao longo da horizontal. Caso os eletrodos de injeção sejam mantidos fixos e apenas os de detecção sejam movidos, a medida será feita em uma maior profundidade. Quando a coleta de dados for finalizada, é possível plotar os pontos medidos através da seção e realizar seu contorno, que mostrará a variação lateral e vertical da resistividade aparente (MUSSETT & KHAN, 2009).

### 6.4 Arranjos de Campo

A escolha de um arranjo para um levantamento de dados de eletrorresistividade, depende do tipo de estrutura a ser estudada, da

sensibilidade do medidor de resistividade, da profundidade desejada, sinal de ruído da área. Os arranjos de maior uso são: Pólo-Pólo, Pólo-Dipólo, Wenner, Wenner-Schlumberger, Gradiente, Schlumberger e Dipólo-Dipólo. (MUSSET & KHAN, 2009).

### 6.4.1 Schlumberger

Normalmente utilizado nas Sondagens Elétricas Verticais, esse arranjo possui disposição eletródica em que os eletrodos de potencial (MN) são colocados entre os eletrodos de corrente (AB), distribuídos de modo simétrico a um ponto central. É necessária a distância MN menor que a metade da distância entre AB.

A injeção de corrente elétrica diretamente no solo, através dos eletrodos (metálicos ou porosos), resulta em uma resposta da diferença de potencial. Com os valores da corrente e do potencial obtidos e registrados, é possível realizar a estimativa da resistividade dos materiais em subsuperfície do local investigado.

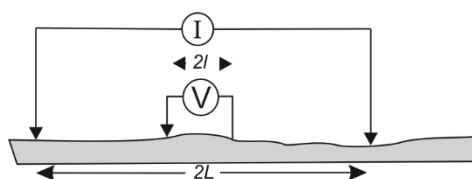
O único arranjo que disponibiliza uma maior quantidade de dados para interpretação, pois é relacionado como o 'arranjo ideal', com distância desprezível entre os eletrodos (de potencial) e geralmente usado para trabalhos em investigação em profundidade. A diferença desse arranjo para o arranjo de Wenner é que os eletrodos de injeção são mais próximos e fixos (FIGURA 18) (MUSSETT & KHAN, 2009).

Figura 18 - Esquema da disposição e abertura dos eletrodos no arranjo eletródico Schlumberger.

Schlumberger

$$\text{Exato } p = \pi \frac{L^2 - l^2}{2l} \frac{V}{I}$$

$$\text{Dipolo Ideal ' } a = 2l \text{ ' } p = \pi \frac{L^2}{a} \frac{V}{I}$$



Fonte: Modificado de Milson & Ericksen (2011)

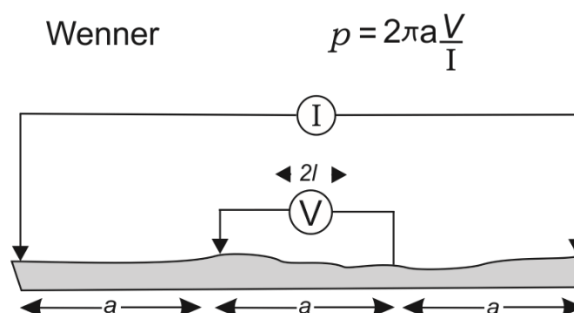
Esse tipo de arranjo é geralmente utilizado para realizar a Sondagem Elétrica Vertical (SEV), bons resultados para trabalhos em profundidade e detecção de corpos horizontalizados.

#### 6.4.2 Wenner

Nesse arranjo os eletrodos de injeção e detecção não são fixos e são movidos a uma distância igual para realizar a medida da resistividade (FIGURA 19). Quando comparado com o Schlumberger e ao Dipolo-Dipolo, possui uma menor geração de dados por metro de investigação.

Esse arranjo é bastante utilizado para levantamentos que demandam grandes profundidades. Porém, como há o deslocamento dos quatro eletrodos, há uma chance maior de ruídos externos interferirem nas medidas de resistividade, bem como a possibilidade de a corrente elétrica atingir um corpo heterogêneo e modificar o caminho da corrente. Possui uma baixa resolução para cobertura horizontal, pois com o aumento do espaçamento há a probabilidade da apresentação de ruídos. O arranjo Wenner apresenta bons resultados para identificar estruturas horizontais como camadas e não é muito usado para detecção de estruturas verticais e estreitas como falhas, fraturas e diques (MILSON & ERICKSEN, 2011).

Figura 19 - Esquema da disposição e abertura dos eletrodos no arranjo eletródico Wenner.



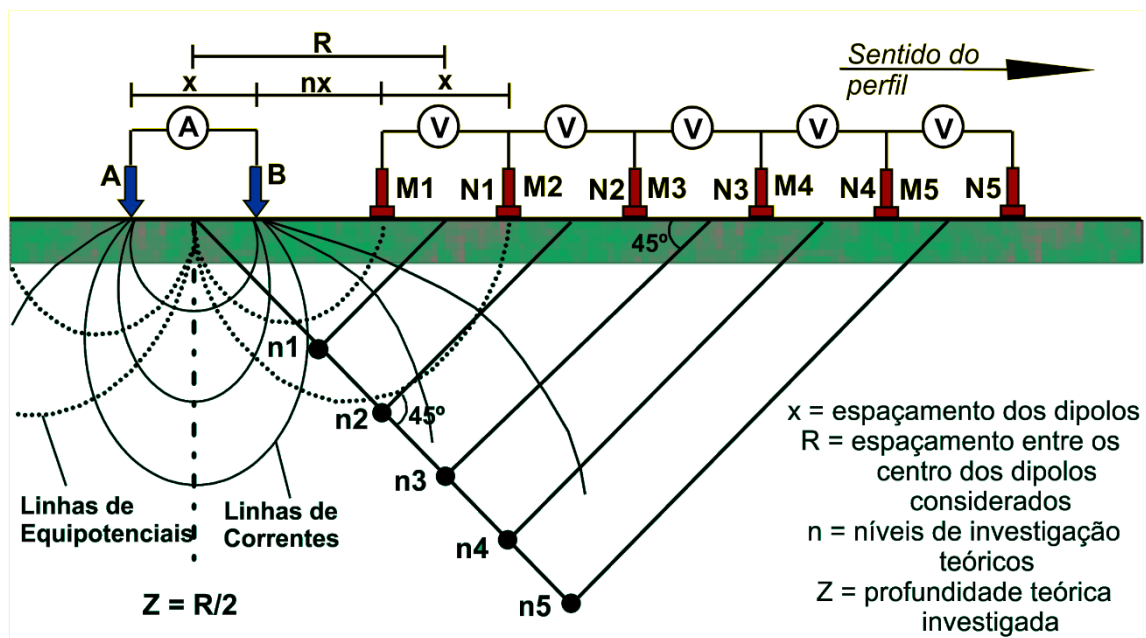
Fonte: Modificado de Milson & Ericksen (2011)

#### 6.4.3 Dipolo-Dipolo

Nesse arranjo os dois pares de eletrodos, corrente e potencial, são movidos com a mesma separação fixa, ao longo de um perfil, muitas vezes

apenas os eletrodos de potencial são movidos (FIGURA 20). Após realizar o primeiro nível de investigação, o par de eletrodos de corrente é movido em uma razão fixa, para atingir o segundo nível de investigação. Esse arranjo possui sensibilidade a variações horizontais de resistividade. A desvantagem é a perda de sinal recebido com o aumento da distância dos pares de eletrodos de injeção e detecção. É ideal para realizar o levantamento em grande profundidade e com uma maior resolução de detalhes (MILSOM & ERIKSEN, 2011).

Figura 20 - Esquema de movimentação dos eletrodos feita para a obtenção de dados em diferentes níveis de investigação. O arranjo utilizado no esquema é o Dipolo-Dipolo



Fonte: Modificado de Braga (2006).

## 6.5 Trabalhos de geofísica aplicada em estudos ambientais

A geofísica no contexto ambiental é de extrema importância, pois é um método barato e não invasivo para a detecção de contaminações, águas subterrâneas, presença de construções antrópicas. A maioria dos métodos geofísicos usados nessas áreas são principalmente os elétricos e eletromagnéticos.

Em uma área de disposição de resíduos sólidos na cidade de Porto Velho – RO, Costa (2008) aplicou SEV e tomografia elétrica, e determinou o local da pluma de contaminação, que foi comprovada através de análises

físico-químicas e biológicas. Comprovou também, através dos valores de resistividade mais baixos, que o lixiviado estava presente nas fraturas no embasamento cristalino e a área estava inadequada para receber esse tipo de empreendimento, não estando de acordo com a legislação vigente, e prejudicou as famílias próximas e contaminou o solo e as águas subterrâneas e superficiais.

No aterro de resíduos sólidos urbanos de Rio Claro, Bortolin & Malagutti Filho (2012) foram capazes de determinar através de dados de Eletrorresistividade dos anos de 1999 e 2008, que a pluma de contaminação estava maior e mais profunda no ano de 2008, quando comparado com o ano de 1999. Esse resultado apresenta uma surpresa para o comportamento de um aterro que já havia sido desativado há uma década. Determinaram que grande parte da contribuição da contaminação foram das lagoas de contenção de chorume.

Na cidade de Corigliano d'Otranto, De Carlo et. al (2013) estudaram uma antiga pedreira de calcário que foi preenchida com mais de 20 m de resíduos sólidos e confinado na base com uma manta de alta densidade de polietileno. Após esgotar seu espaço, uma área próxima (outra parte da pedreira) começou a receber algumas obras para a construção de um novo aterro. Durante as obras foi constatado a presença de chorume. Ao utilizar tomografia elétrica e a técnica MALM (*mise-à-la-masse*), foram capazes de determinar que havia um corpo de baixa condutividade até 40 m de profundidade, indo contra os 20 m de resíduos anteriormente confinados. Através de um modelamento 3D, puderam constatar que pode haver algum dano na manta de polietileno que deixa o chorume gerado infiltrar o subsolo e contaminar as águas subterrâneas, pois a porção mais profunda é de um calcarenito que possui diferentes litofácies e consequentemente propriedade hidráulicas.

Um aterro na cidade de Sabiñánigo na Espanha, próximo a uma represa de hidrelétrica, foi estudado pelo governo local através de piezômetros, poços de monitoramento e análises químicas uma possível contaminação. Casado et. al (2015) realizaram perfis de tomografia elétrica ao sul do aterro, que é onde está a contaminação. Estimaram um total de 240.298 m<sup>3</sup> de resíduos urbanos e industriais. A associação litológica da área (marga, cascalho com matriz argilo arenosa, estratos glacio lacustrinos e uma camada antropogênica) não está

associada a mudanças da resistividade, que indica a presença de chorume fora da área do aterro. Através de análises hidroquímica, constataram a presença de dois tipos de chorume gerados e a mistura deles nos depósitos aluvionares, que ocorre devido à percolação do chorume em zonas fraturadas da margem, que foram determinadas pela tomografia elétrica.

Na cidade de Santa Ernestina – SP, Veloso et al. (2015), obtiveram valores de alta cargabilidade em um local que houve derramamento de diesel. Esses valores de alta cargabilidade estão relacionados ao processo de biodegradação dos contaminantes, que com a presença de ácidos orgânicos, há a modificação das condições físico-químicas ambientais, que libera elementos para a fase dissolvida da contaminação. Esses elementos dissolvidos estão associados a neoformação mineral, principalmente de óxidos, hidróxidos e sulfetos, que explicaria a alta cargabilidade, indicado uma área em um estágio avançado de atenuação.

Em um aterro no nordeste da França, localizada na Bacia Permiana Giromagny, com a presença de xistos e outras litologias, Bichet et. al (2016) realizaram medidas estruturais e da dinâmica da água subterrânea por piezômetros. Ao terem esses dados, devido à complexidade do meio geológico, realizaram 21 perfis de tomografia elétrica, que cobriram uma área dentro e fora do aterro. Com os resultados obtidos, puderam constatar os limites do aterro (tanto da célula antiga, quanto da célula nova), além de que há uma falha na contenção ou drenagem de chorume da célula nova. Verificaram uma pluma de contaminação oriunda da célula antiga, além de que os valores de resistividade dessa pluma decaem com a profundidade, devido à mineralização que esse chorume pode ter sofrido durante os anos. Constataram que há um substrato geológico altamente fraturado e com um fluxo da água subterrânea descontínua. A distribuição espacial da pluma de chorume consiste na direção das fraturas e do gradiente hidráulico. Definiram que a pluma de contaminação não ultrapassa algumas dezenas de metros da área fonte.

Em áreas já contaminadas e em processo de remediação, é necessário algum método para avaliar a eficácia da metodologia usada. Tildy et. al (2017) desenvolveram uma técnica de mensurar e monitorar o processo de oxidação da área de remediação. Ao utilizar tomografia elétrica 2D e um *time lapse* 3D, determinaram que os valores de resistividade do solo da área modificaram

devido a ação do agente químico e da biodegradação química dos solventes orgânicos. Através do modelo 3D, foi possível constatar um faturamento do solo, devido à alta pressão de injeção do agente químico. Baseado nos resultados, puderam prover uma ferramenta de monitoramento para áreas de remediação que usem essa técnica de biodegradação química com agentes oxidantes.

Nesse contexto, a geofísica é uma ferramenta de grande importância para caracterizar o meio geológico e detectar anomalias (contaminações, águas subterrâneas, mineralizações) com baixo custo. Desse modo, é possível evitar trabalho desnecessário e propor locais para perfuração e coleta de material para análises químicas, biológicas e geoquímicas.

## **7. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTOS**

Para facilitar o posicionamento espacial dos perfis de aquisição, foi realizada uma vistoria na área de estudo para poder local os perfis. Com isso, foi possível constatar diversos problemas preliminares da área.

Foi determinado visualmente os locais que limitam o lixão. Com esse diagnóstico, foi possível observar que o terreno possui um desnível acentuado no ponto onde marca os limites do lixão. Nesse desnível, é facilmente visualizado a presença de resíduos dos mais diversos tipos.

No centro do lixão, há a presença de gramíneas e blocos de rochas sobre a camada que cobre os resíduos, em uma tentativa de deixar o ambiente com as mesmas características fisiográficas da região.

Porém, ainda no centro do lixão, há pequenos desníveis em que há a ocorrência de resíduos e a infiltração da água pluvial pela parte superior que escorre pelas laterais do lixão, nos mais diversos níveis, na parte basal onde há o maior acúmulo de lixiviado que segue em direção a um pequeno córrego que desagua no Rio Camaquã das Lavras.

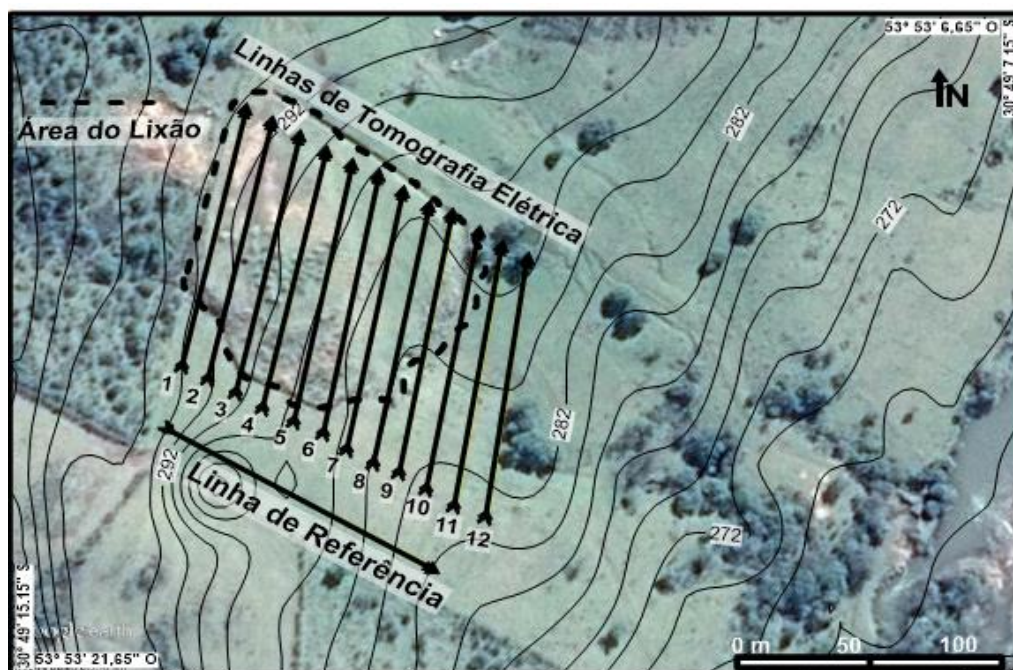
### **7.1 Aquisição Geofísica**

Foram realizados 12 perfis de Eletrorresistividade (técnica de tomografia elétrica) e Polarização Induzida, além de um adicional que representa a linha de referência, todos contêm 105 m de distância total, com espaçamento dos eletrodos de 5 m e de 10m entre os perfis (FIGURA 21). Os arranjos utilizados neste levantamento foram Dipolo-Dipolo e Schlumberger.

Para a obtenção das medidas de resistividade e cargabilidade, foi utilizado um resistímetro modelo Terrameter LS, produzido pelo ABEM, de origem sueca. Os acessórios necessários para o levantamento de dados são eletrodos de campo não polarizáveis, solução de sulfato de cobre, cabos de conexão entre o resistímetro e os eletrodos e suas respectivas ligações, duas fitas métricas de 50 m, além de uma enxada para a retirada superficial da vegetação, para que o eletrodo fique em contato diretamente com o solo (FIGURA 22).

Os eletrodos não polarizáveis usados são tubos de PVC com uma base porosa e uma haste de algum metal imerso em solução salina do mesmo metal. São utilizados para trabalhos geofísicos pois, por não serem metálicos, não sofrem efeitos da polarização e não modificam os resultados obtidos.

Figura 21 - Mapa com os perfis de tomografia elétrica realizados, com os limites do lixão e as curvas de nível topográfico, evidencia o declive da área de estudo para o Rio Camaquã das Lavras.



Fonte: Modificado do *Google Earth*.

Após os perfis locados e o resistivímetro devidamente configurado com as informações necessárias, tais como arranjo a ser utilizado, distância entre os eletrodos, foi feita a abertura dos perfis e obtenção dos seus respectivos dados.

Uma etapa importante, que deve ser usada para ter resultados mais precisos, é a inclusão da topografia no momento do processamento. A topografia exerce grande influência em como a corrente elétrica é dispersa e medida. Uma grande variação de relevo, sem o devido ajuste no processamento, pode acarretar em resultados que não descrevam o que de fato ocorre no substrato geológico. Os dados topográficos foram retirados de um mapa de modelo digital de terreno.

Após a etapa de filtragem dos dados, é realizado o processamento dos dados através do software de imageamento geolétrico RES2DINV, da companhia Geotomo Software. Os dados de resistividade e cargabilidade foram interpolados através do método de interpolação de mínimos quadrados. Foram obtidas as seções em profundidade e distância dos respectivos isovalores interpolados, para os dois parâmetros analisados.

Figura 22 - Mosaico de fotos que mostra as fases de levantamento geofísico. (A) Preenchimento do eletrodo não polarizável com solução de sulfato de cobre. (B) Vista de um dos perfis de tomografia elétrica. (C) Resistivímetro conectado a bateria, durante o levantamento de dados em campo, além dos cabos de conexão e do eletrodo não polarizável.



Há a necessidade de deixar todos os perfis na mesma escala de resistividade e cargabilidade, além das dimensões horizontais e verticais, que devem ser feitos diretamente no programa, ao mudar parâmetros no processamento para obter o resultado que julgar de melhor qualidade.

Para a geração do pseudo 3D, foi utilizado o programa Oasis Montaj da desenvolvedora Geosoft, que teve seus recursos adaptados para o uso de

dados geofísicos. Através da seleção dos parâmetros desejados (como a escolha dos dados que serão interpolados), o tipo de interpolador (krigagem, mínima curvatura, inverso da distância ou triangulação), os níveis de investigação atingidos, o programa irá criar uma imagem em 3D, que é possível realizar diversos cortes na profundidade desejada, para acompanhar o resultado em diferentes níveis de investigação.

## **7.2 Análise e Interpretação dos Dados**

Essa etapa consiste em analisar e interpretar as seções elétricas obtidas na etapa anterior, através da integração dos dados obtidos pela aquisição geofísica com as informações pertinentes da área como o contexto geológico, estrutural e construtivo do lixão.

Com o imageamento elétrico 2D e pseudo 3D da área, é possível determinar caso haja ou não uma possível pluma de contaminação e estimar um possível tamanho para a mesma, seus limites laterais e em profundidade. Detectar a presença de fraturas que possam estar preenchidas pela água contaminada e sua direção de fluxo. Além de conseguir detectar onde está preenchido por resíduos sólidos e sua profundidade.

Através desse processo de interpretação, é possível determinar pontos para realizar coletas de água/solo/resíduos para análises químicas, caso isso seja conivente com o trabalho proposto, ou mesmo como uma informação adicional que pode ser entregue às autoridades responsáveis pelo local.

Para todas as etapas propostas, tanto equipamento como acessórios e *softwares* utilizados no processamento, são de propriedade da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” campus Rio Claro. A etapa de processamento, inversões e georrefenciamento foram feitas no Departamento de Geologia Aplicada.

## **7.3 Controle Estrutural**

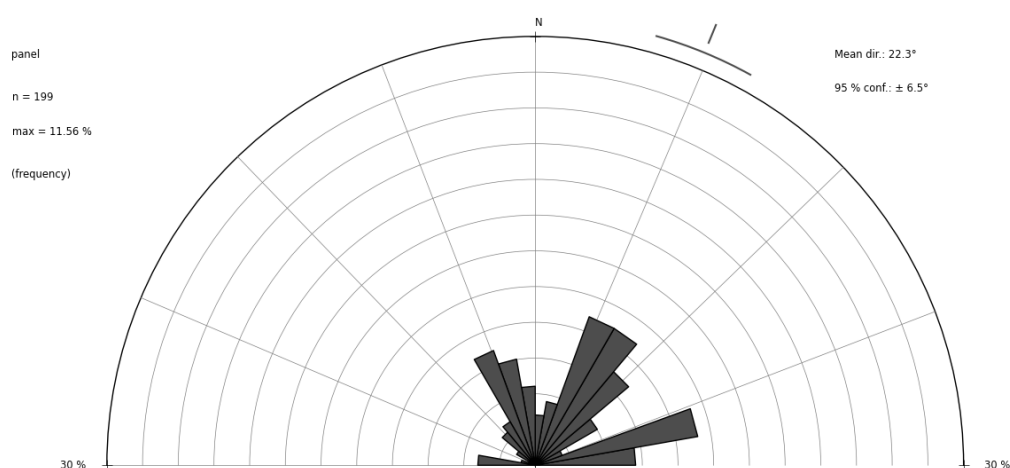
Para o reconhecimento da geologia estrutural do local, foram realizadas 200 medidas através da bússola, pelo método da trama (dip direction). As medidas foram tabeladas e com elas geradas um diagrama de roseta.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Controle Estrutural

Há duas famílias mais importantes de fraturas presentes na área de estudo, enquanto há uma família de fraturas menos significativa. A primeira família de fraturas possui moda da direção de N40-60E e ângulo de mergulho que varia de 80° a 50°. Enquanto a segunda família de fraturas possui moda de direção de S30-50W e ângulo de mergulho que varia de 80° a 50°. A primeira família de fraturas é paralela ao braço do rio, à direita da área de estudo, e a segunda família de fraturas é paralela ao braço do rio ao sul (FIGURA 23).

Figura 23 - Diagrama de Roseta das principais zonas fraturadas da área.



### 8.2 Geofísica 2D

A apresentação dos resultados é feita com os dois arranjos utilizados e discutidos simultaneamente, e foram comparados apenas os pontos que diferem um do outro.

É necessário ressaltar, que os resultados gerados dos dois arranjos possuem similaridades entre si. Como o caso da suavização dos isovalores, quando não há valores de contrastes acentuados, além da distribuição da resistividade horizontalizada, perceptível em ambos os arranjos. Há de

considerar também o efeito de borda, que nada mais é do que a extrapolação dos valores altos e baixos, próximos aos limites do perfil da aquisição de dados. Outra questão a ser abordada é o maior número de iterações em perfis que possuem um conjunto de dados com um contraste de resistividade mais evidente.

Vale ressaltar também que é necessário realizar o processamento com os dados topográficos, que possuem grande influência na forma que a corrente elétrica é dissipada no substrato geológico. Não obstante a isso, a interpretação pode ser feita tanto para a cota altimétrica quanto para a profundidade a partir da superfície de locação dos eletrodos.

Para poder discutir os pontos diferentes entre os arranjos e determinar o que é contaminação, maciço rochoso ou regolito, é necessário basear os valores de resistividade da linha de referência, um local onde não há influência dos fenômenos que ocorrem na área do lixão e que demonstra o comportamento do substrato geológico de forma natural.

Os valores que estão abaixo de 130 Ohm.m, são considerados como resultado da contaminação do ambiente. Valores próximos de 130 Ohm.m indicam um contaminante dissolvido no fluido de percolação, enquanto valores abaixo indicam que o contaminante estará mais concentrado.

Valores entre 130 Ohm.m e 1481 Ohm.m indicam o regolito e a rocha com um certo grau de alteração. Valores intermediários como 400 Ohm.m podem indicar um regolito saturado, enquanto valores maiores, a presença de fluídos é menor. Valores superiores a 1481 Ohm.m indicam a rocha sã, ou seja, o maciço rochoso não alterado.

### **8.2.1 Resistividade**

No perfil 1, logo no início é possível observar altas resistividades próximas a 5000 Ohm.m que vai até aproximadamente 50 m, que seriam correlatas ao maciço rochoso em que o lixão está inserido. Os dois arranjos apresentaram um resultado similar (FIGURAS 24 e 25), as diferenças que existem é de que no arranjo Dipolo-Dipolo, em aproximadamente 50 m de distância, há uma zona de baixa resistividade que está ligada há uma zona maior e próxima da superfície, enquanto no arranjo Schlumberger, não há esse

contraste e a zona maior de baixa resistividades é mais profunda, com valores que chegam a 1 Ohm.m. Vale ressaltar que no início dos dois arranjos há uma zona de baixa resistividade, possivelmente relacionada a um efeito de borda do processamento.

Os perfis 2 e 3 apresentam uma zona de alta resistividade (maiores que 1481 Ohm.m) na cota altimétrica de 285 m, possivelmente relacionada ao embasamento granítico do lixão, em ambos os arranjos (FIGURAS 24 e 25). Os dois perfis apresentam para os dois arranjos um padrão horizontalizado na distribuição das resistividades, os menos resistivos (38,4 Ohm.m) estão próximos à superfície e aumentam seu valor em razão da profundidade. Esse padrão pode ser explicado pelo tipo de disposição do resíduo que era feito anteriormente, pois utilizava a topografia remanescente da pedreira e sem nenhuma cobertura inicial de camada de solo/argila.

No perfil 4, há uma maior variação dos valores de resistividade, porém quando comparados os arranjos, apresentam quase os mesmos resultados. Valores de alta resistividade superiores a 1481 Ohm.m estão mais visíveis no arranjo Dipolo-Dipolo e no Schlumberger variam até chegar ao máximo, que indica a presença da rocha sã na cota altimétrica aproximada de 275 m. No meio do perfil do arranjo Dipolo-Dipolo há a presença de um valor de alta resistividade próxima a superfície, que pode ser um matacão, porém abaixo desse matacão há valores de resistividade menores que 130 Ohm.m, que indica uma ligação entre o início e final do perfil com esses mesmos valores, relacionado ao lixiviado dos resíduos. Essa ligação pode estar relacionada a uma zona fraturada.

No final do perfil, de ambos os arranjos, é possível observar uma zona de baixa resistividade (valores menores que 130 Ohm.m), só que no arranjo Schlumberger essa zona é mais profunda (FIGURAS 24 e 25). De acordo com os resultados apresentados, o perfil parece ter sido assentado sobre a parte em que há uma maior quantidade de resíduos.

Nos perfis 5 e 6, há o mesmo tipo de distribuição nos valores de resistividades, de forma horizontalizada, com os valores mais baixos (menores que 130 Ohm.m) próximos à superfície e valores elevados em razão da profundidade, que atinge a rocha sã na cota altimétrica aproximada de 285 m e 275 m.

Figura 24 – Mosaico das linhas de resistividade do arranjo Dipolo-Dipolo (Linhas 1 a 6) e da linha de referência. Destaque para a zonas de possível contaminação (baixa resistividade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.

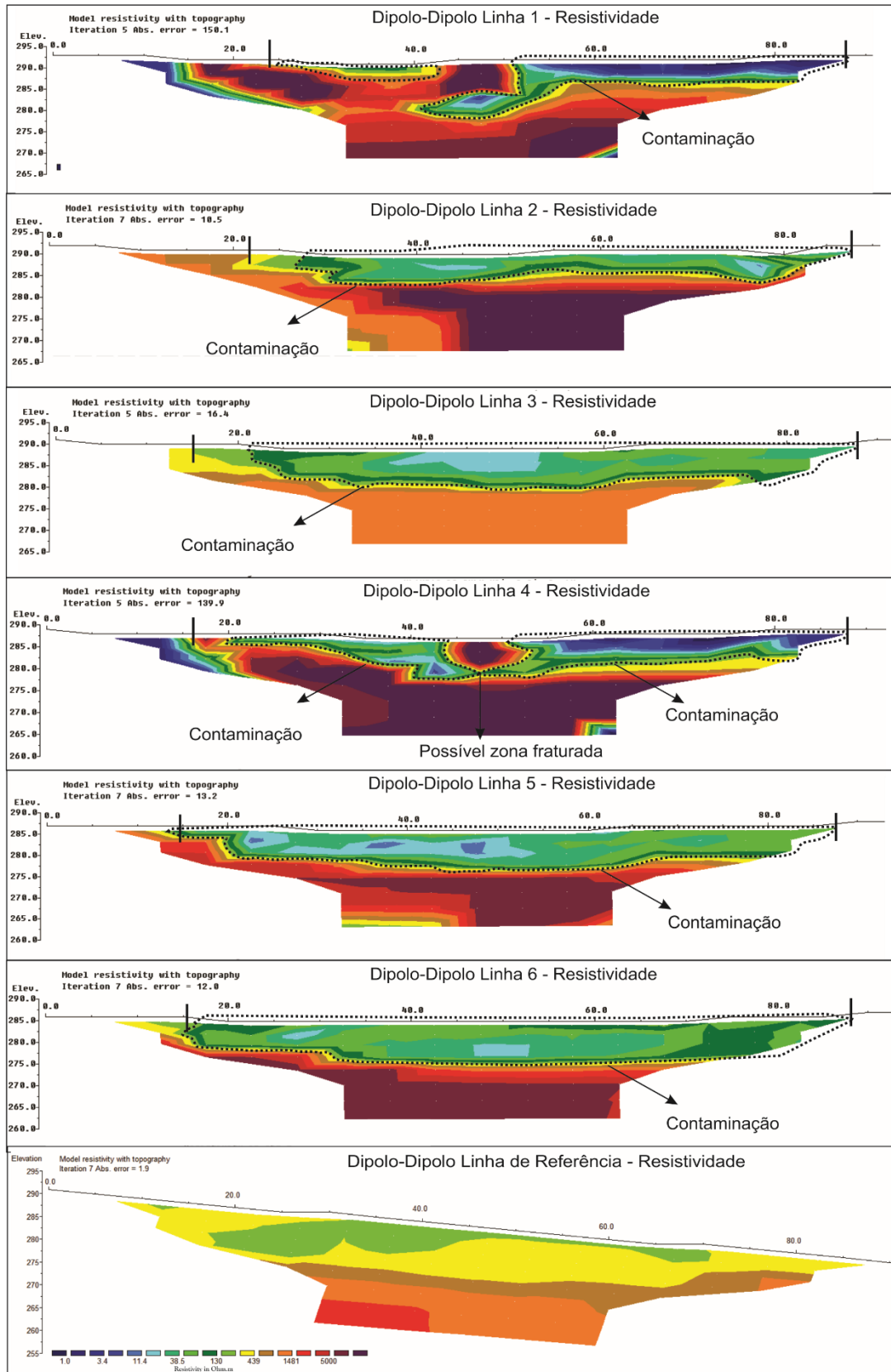
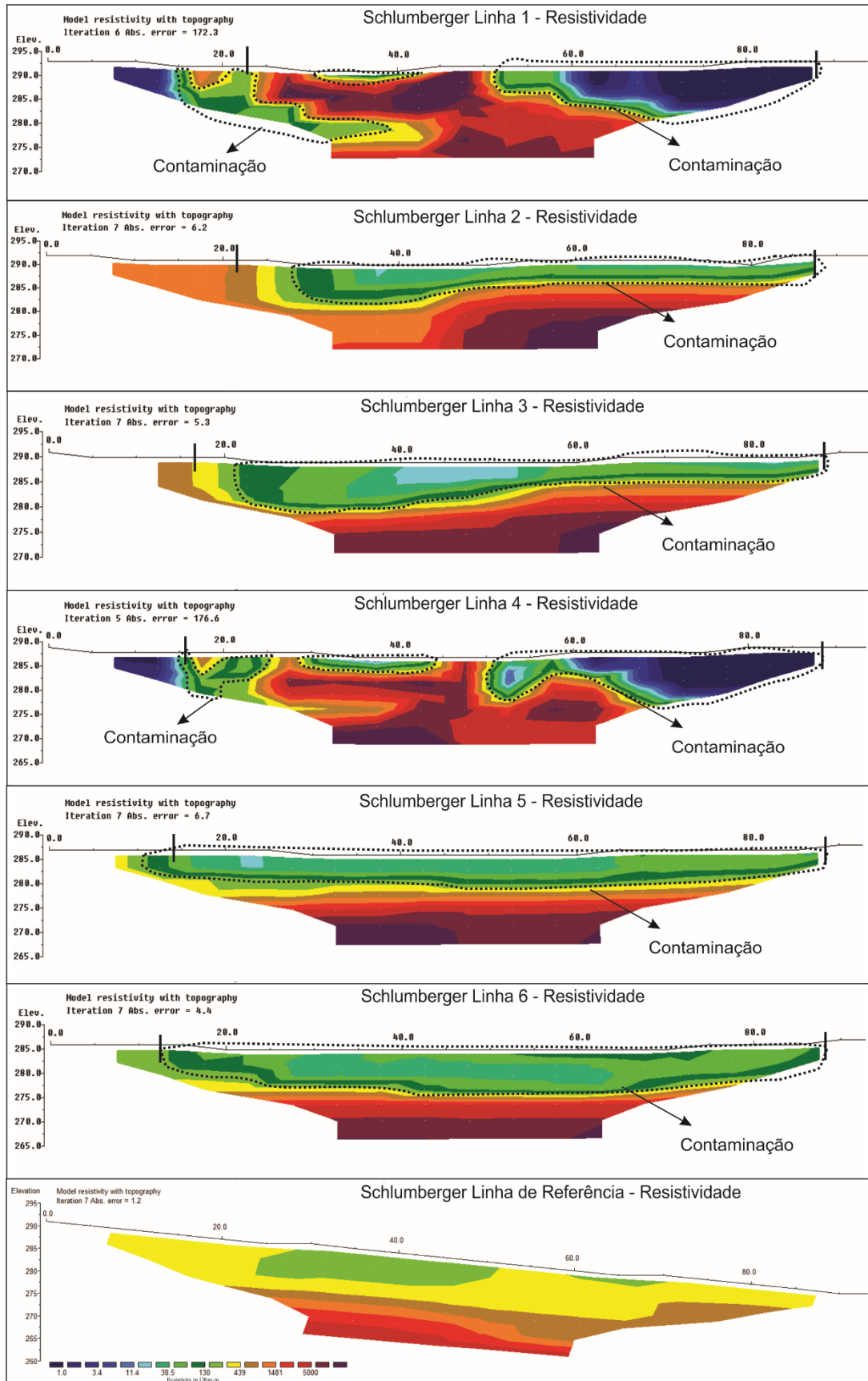


Figura 25 - Mosaico das linhas de resistividade do arranjo Schlumberger (Linhas 1 a 6) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa resistividade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.



No perfil 7, assim como ocorreu com o perfil 4, possui uma maior variação nos valores de resistividade e apresentam resultados similares. No arranjo Dipolo-Dipolo há uma zona de baixa resistividade (menor que 130 Ohm.m) aproximadamente 40 m do início do perfil, zona essa que não é tão profunda no arranjo Schlumberger (FIGURAS 24 e 25). Ambos os arranjos apresentam a zona de baixa resistividade no final do perfil, entretanto em profundidades variáveis, no qual a mais profunda é do arranjo Schlumberger.

Nos perfis 8 e 9, ocorreu o mesmo que nos perfis 2, 3, 5 e 6, seus valores são apresentados de forma horizontalizada, com sua distribuição de baixas resistividades (menores que 130 Ohm.m) próximas a superfície e com o aumento da resistividade em função da profundidade. Com o contato da rocha sã, na cota altimétrica de 275 m a 270 m, perceptível pelos valores de resistividade maiores que 1481 Ohm.m (FIGURAS 26 e 27).

O perfil 10 é um perfil que foi alocado dentro e fora do lixão, apresenta valores de resistividades bem contrastantes, além de um possível efeito de borda. Há uma zona de baixa resistividade no final do perfil, relacionadas à área que está dentro do lixão, com valores menores que 130 Ohm.m, que no perfil Schlumberger é uma zona mais profunda do que a apresentada pelo Dipolo-Dipolo. Um dos maiores contrastes entre os dois arranjos é uma possível ligação com o lixão, apresentado na metade do perfil do Dipolo-Dipolo, que não é perceptível no arranjo Schlumberger. A zona fraturada encontrada se assimila as fraturas encontradas por Bichet et al. (2016)

Por ser um perfil que está situado dentro e fora dos limites do lixão, possivelmente a parte final do perfil, que está dentro do lixão, há a infiltração da água superficial e em contato com o lixiviado dos resíduos sólidos, vão até a parte basal do lixão (que seria o limite da antiga pedreira), encontra uma zona de menor resistência para seu fluxo, que seria essa zona fraturada que aprofunda até o início do perfil (FIGURAS 26 e 27).

Figura 26 - Mosaico das linhas de resistividade do arranjo Dipolo-Dipolo (Linhas 7 a 12) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa resistividade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.

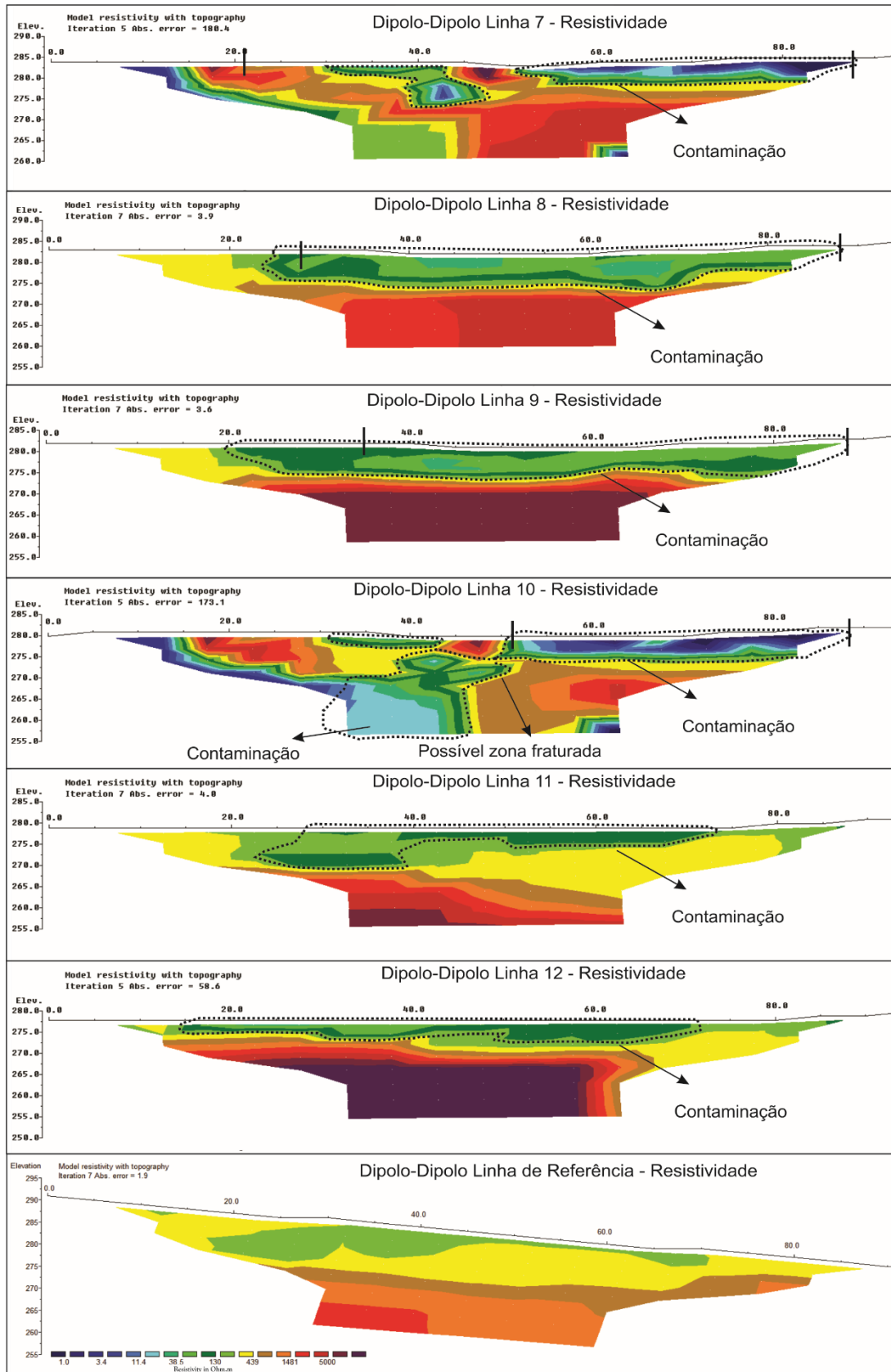
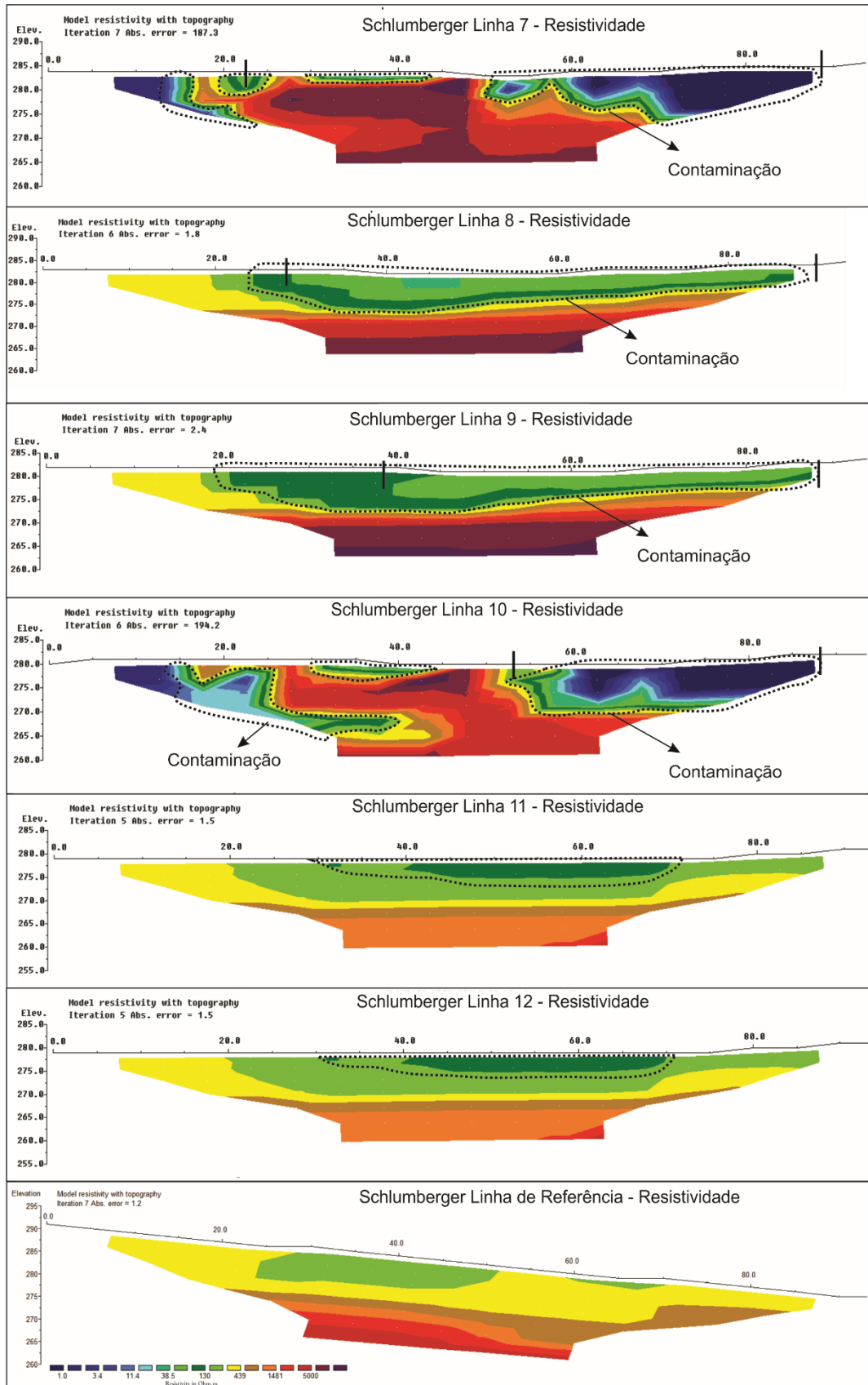


Figura 27 - Mosaico das linhas de resistividade do arranjo Schlumberger (Linhas 7 a 12) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa resistividade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.



Nos perfis 11 e 12, que estão fora dos limites do lixão, apresentam valores de resistividades horizontalizados, com valores mais baixos próximos à superfície (menores que 130 Ohm.m) e valores maiores em decorrência do aumento da profundidade, que atinge a rocha sã (com valores acima de 1481 Ohm.m). A diferença dos dois arranjos é a profundidade do maciço rochoso e a espessura da zona de baixa resistividade. Vale ressaltar que nesse local, fora do limite do lixão, é onde toda a água superficial que drena dentro do lixão é exumada, pelos resíduos que estão aflorantes e que acumulam nessa zona de menor nível topográfico, no sentido do rio Camaquã das Lavras (FIGURAS 26 e 27).

### **8.2.2 Cargabilidade**

Com relação aos valores de cargabilidade, o arranjo Dipolo-Dipolo não fornece informações suficientes para tirar muitas interpretações, apenas que valores abaixo de 1,13 mV/V podem estar correlacionados a presença de água, possivelmente com lixiviado, em sistema de fraturas, que pode ser observado de modo mais fácil nos perfis 1 e 10, além de ocorrerem zonas com essa cargabilidade nos perfis 4 e 7, porém não tão contrastantes com o meio geológico incluso (FIGURAS 28 e 30).

No quesito de melhor resolução dos resultados de cargabilidade, o arranjo Schlumberger apresenta valores que são facilmente visíveis (menores que 0,620 mv/v), que são correlacionados à presença de água e lixiviado nos resíduos sólidos do lixão, que podem ser observados nos perfis 1, 4, 7 e 10, com as cores azuis. A medida que o valor da cargabilidade aumenta até 1,13 mV/V, indica que essa zona está preenchida de minerais polarizáveis, como sulfetos presentes nas fraturas (FIGURAS 29 e 31).

Figura 28 - Mosaico das linhas de cargabilidade do arranjo Dipolo-Dipolo (Linhas 1 a 6) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa cargabilidade), zonas de mineralização de sulfetos (alta cargabilidade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.

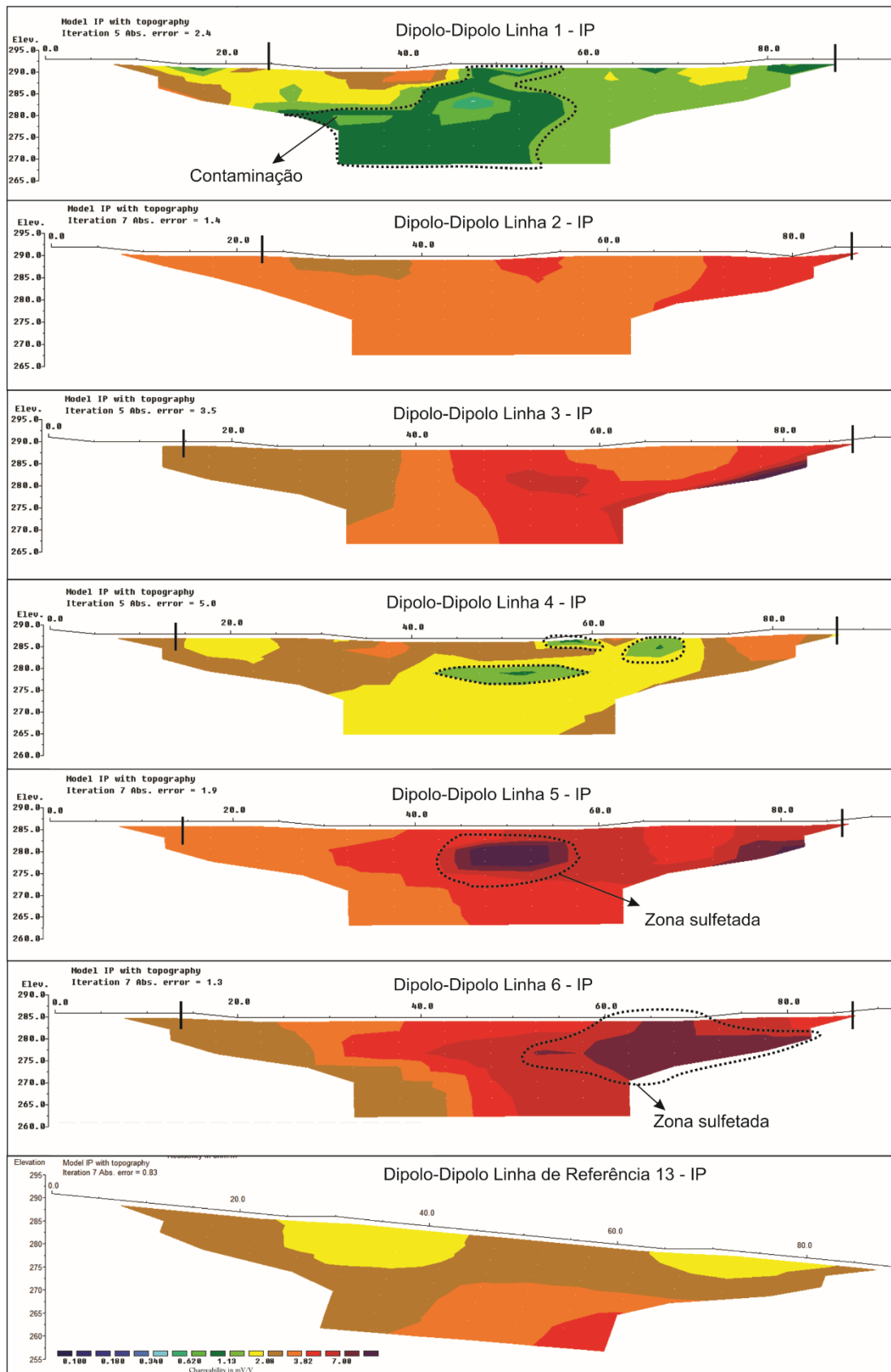


Figura 29 - Mosaico das linhas de cargabilidade do arranjo Schlumberger (Linhas 1 a 6) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa cargabilidade) e zonas de mineralização de sulfetos (alta cargabilidade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.

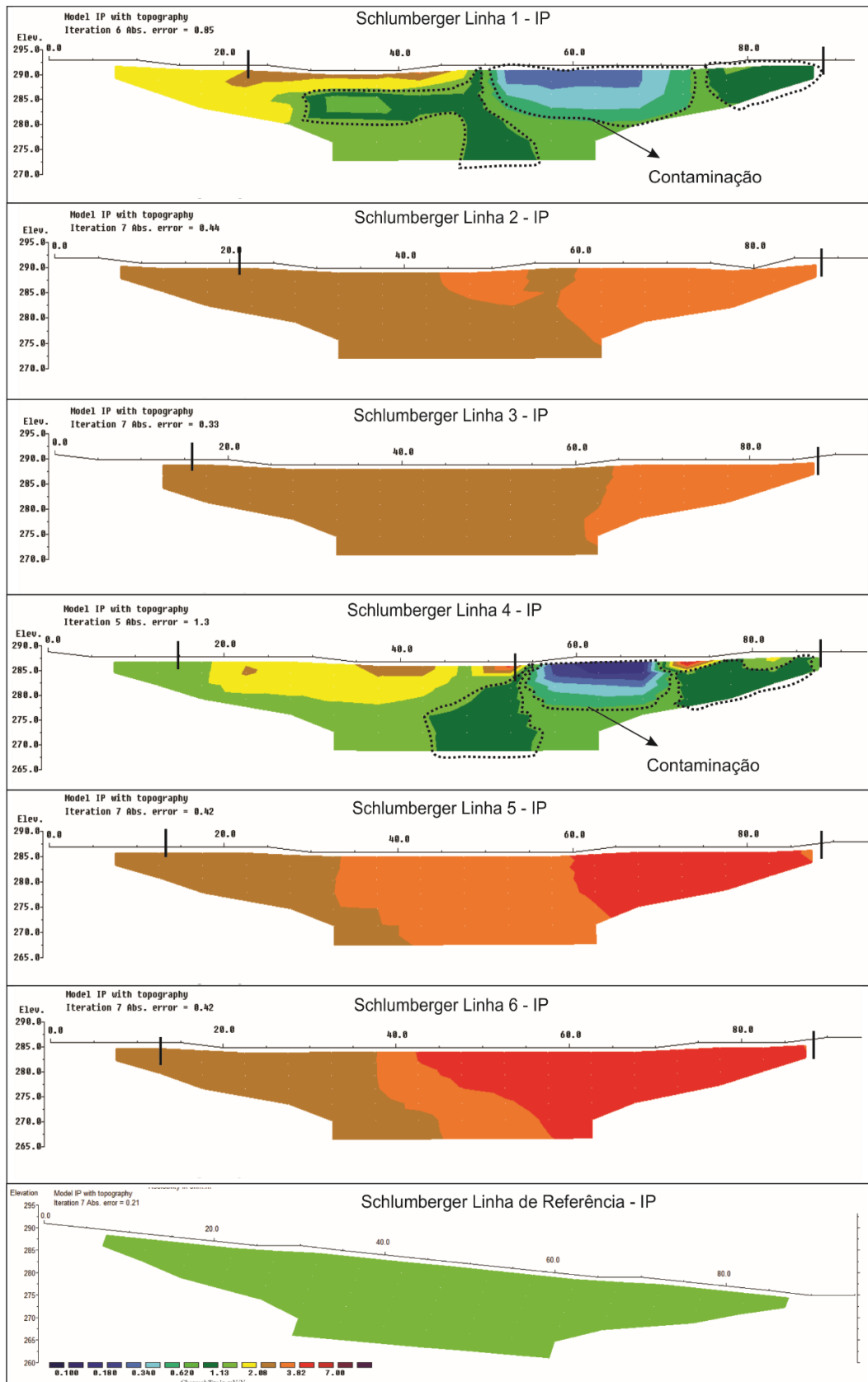


Figura 30 - Mosaico das linhas de cargabilidade do arranjo Dipolo-Dipolo (Linhas 7 a 12) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa cargabilidade) e zonas mineralização de sulfetos (alta cargabilidade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.

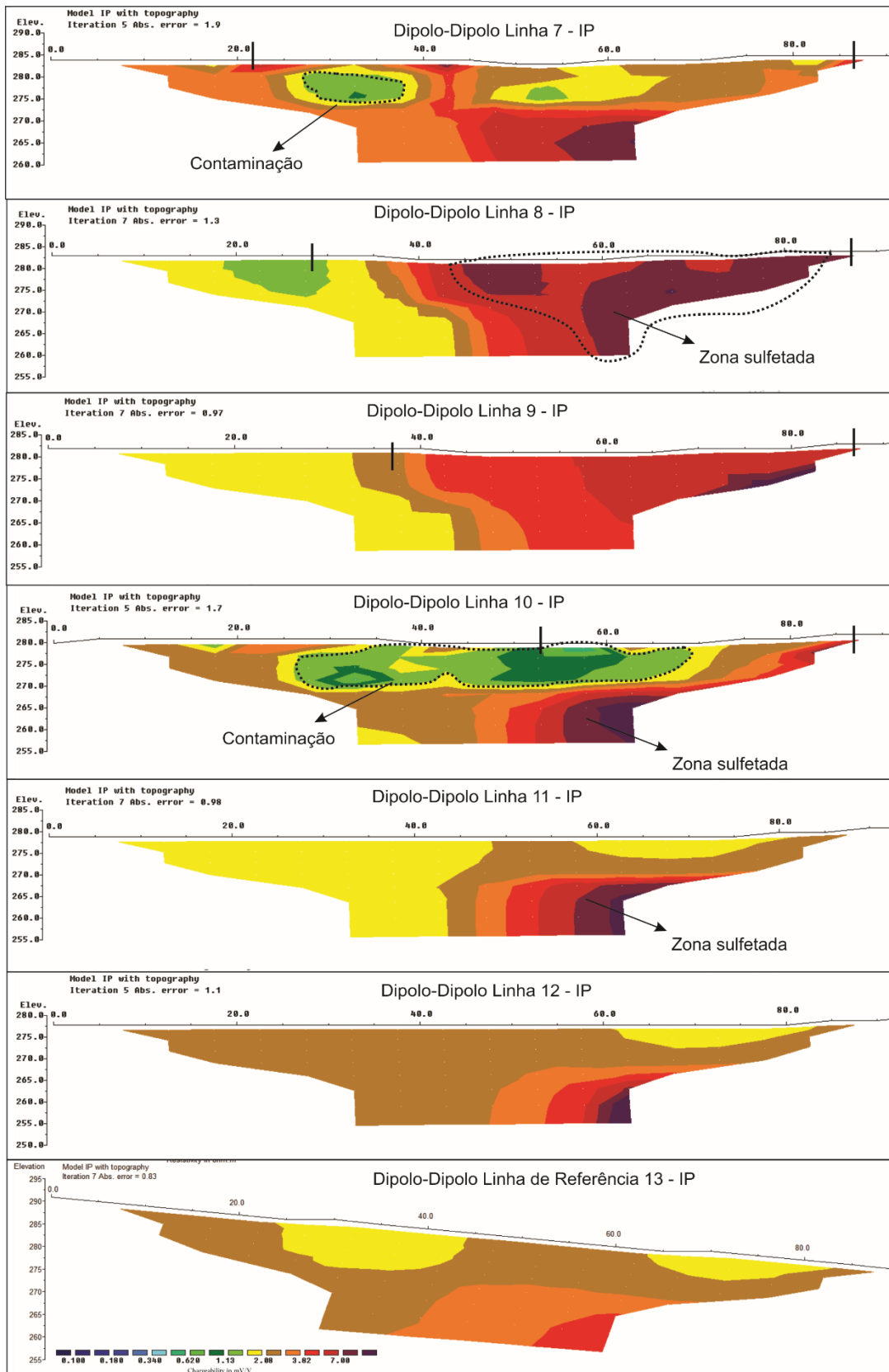
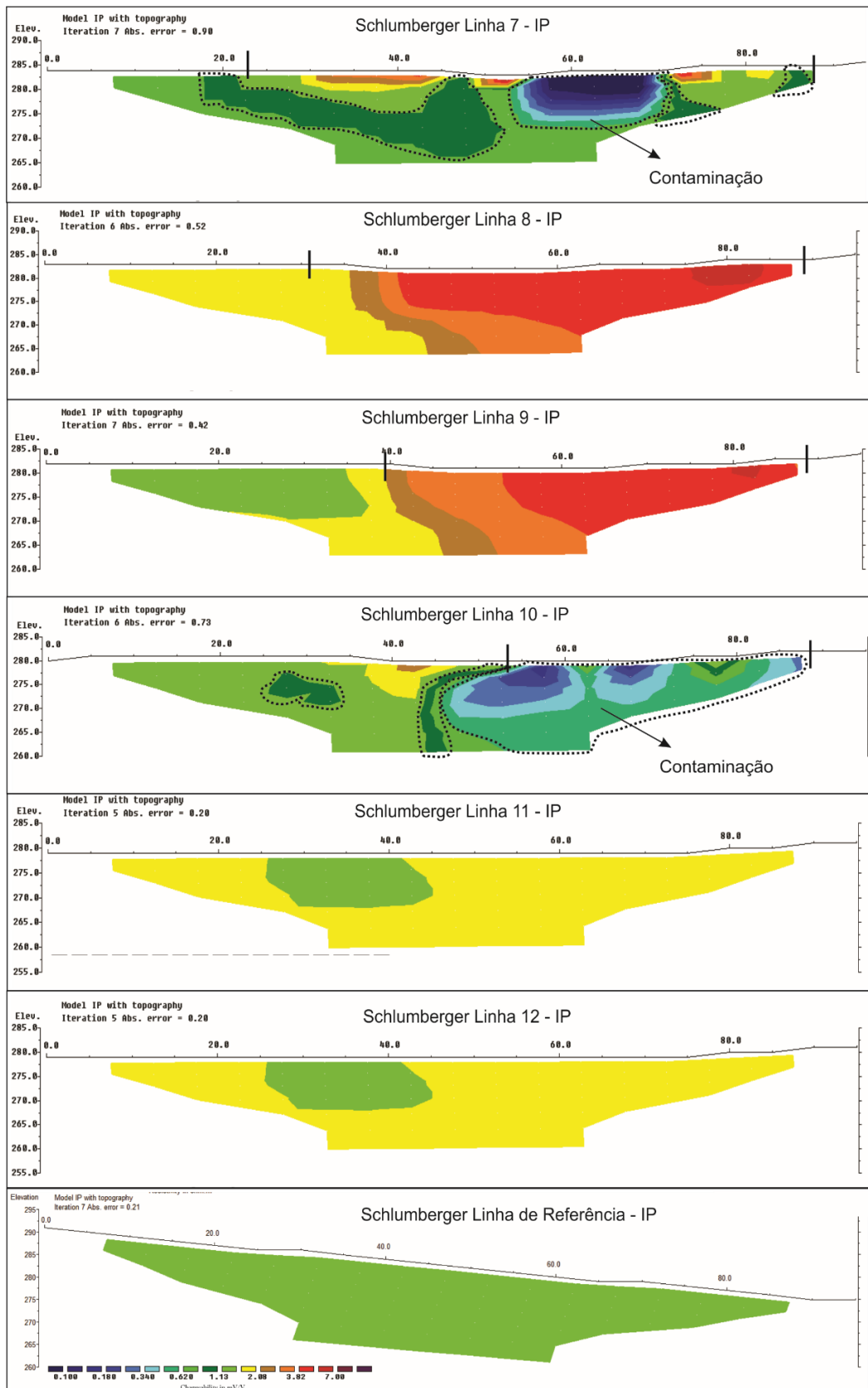


Figura 31 - Mosaico das linhas de cargabilidade do arranjo Schlumberger (Linhas 7 a 12) e da linha de referência. Destaque para as zonas de possível contaminação (baixa cargabilidade) e zonas mineralização de sulfetos (alta cargabilidade) e para as barras verticais que indicam os limites do lixão.



## **8.3 Modelamento 3D**

### **8.3.1 Resistividade**

Os valores de resistividade apresentados em um bloco pseudo 3D, facilita a interpretação dos resultados e a visualização espacial. Como foi possível observar no item 8.2.1, nos perfis 1, 4, 7 e 10, há valores que possuem maior contraste de resistividade, esses locais estão associados a antiga bancada da lavra de granito que tinha anteriormente. Além de ser uma boa maneira para detectar contaminação, a representação 3D dos resultados auxilia na fase de monitoramento de áreas contaminadas (TILDY et al., 2017)

Como é possível observar nos blocos de resistividade para os dois arranjos (FIGURAS 32 a 37), há uma zona de baixa resistividade (menor que 130 Ohm.m) que ocupa uma grande área e com o decréscimo da profundidade diminui até ficar inexistente em profundidade de até 18 ambos arranjos. Essa maior zona de baixo resistivo é associada à presença dos resíduos sólidos dispostos no lixão, que por estarem saturados (devido às águas pluviais de dias anteriores ao campo) apresentaram esse resultado.

No arranjo Schlumberger as zonas de baixa resistividade diminuem até a profundidade de 21 m, essas menores áreas podem estar relacionadas à presença de fraturas e a percolação do lixiviado nessas fraturas.

Por outro lado, caso não tivesse chovido na semana do campo, possivelmente toda a zona que foi detectada com resíduos, iria apresentar valores de resistividade homogêneos e não seria possível determinar onde estão os resíduos. Por isso a presença da água que infiltrou nos resíduos, ajudou a obter melhores resultados e comprovar que há a infiltração nos resíduos e conseqüentemente a contaminação do meio.

A água que percola os resíduos retira íons dos materiais e deixa o fluido mais condutivo. Além de que, durante o processo de degradação da matéria orgânica, há a liberação de íons de enxofre, que em meio oxidante se transformam em íons sulfato e ajudam a conduzir a eletricidade. Outros íons metálicos podem ser dissolvidos na água de infiltração e assim aumentar a condutividade presente no lixiviado.

Logo é possível determinar que a área do lixão é toda a área de baixa resistividade (FIGURAS 32 e 35), devidamente circulado logo na profundidade de 3 metros.

Figura 32 - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Dipolo-Dipolo, da superfície até 9 m de profundidade. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas

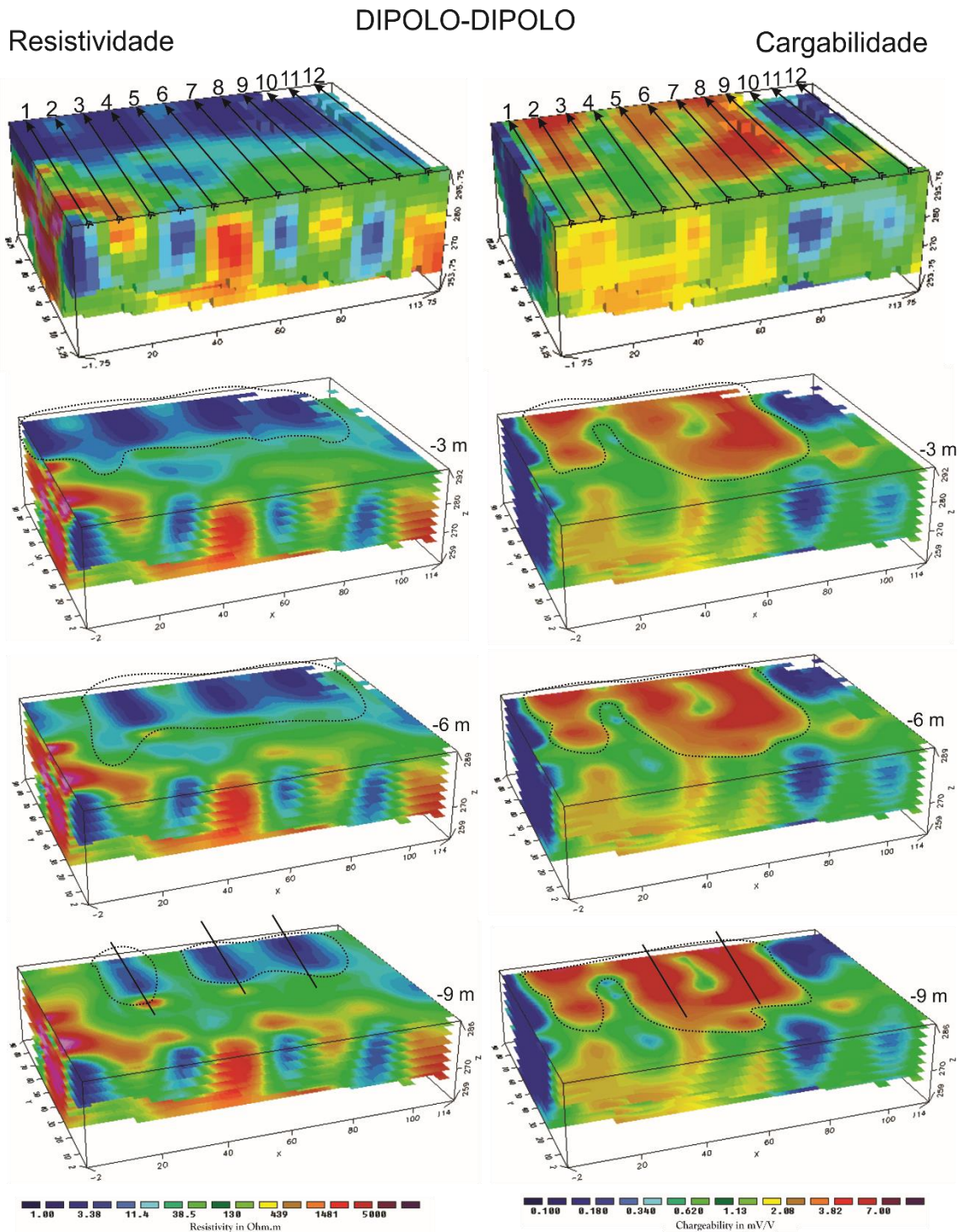


Figura 33 - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Dipolo-Dipolo, de 12 m de profundidade até 24 m. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas.

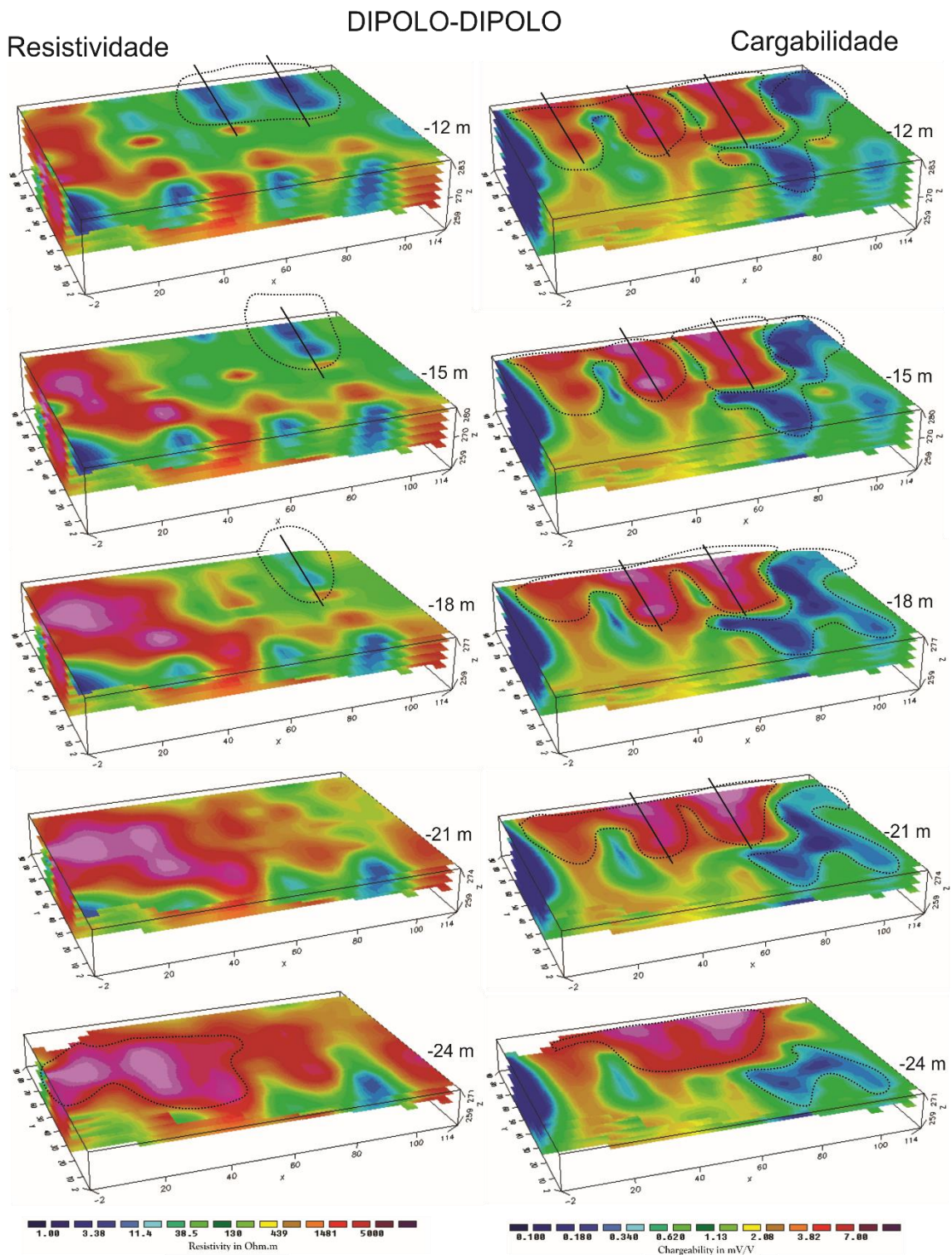
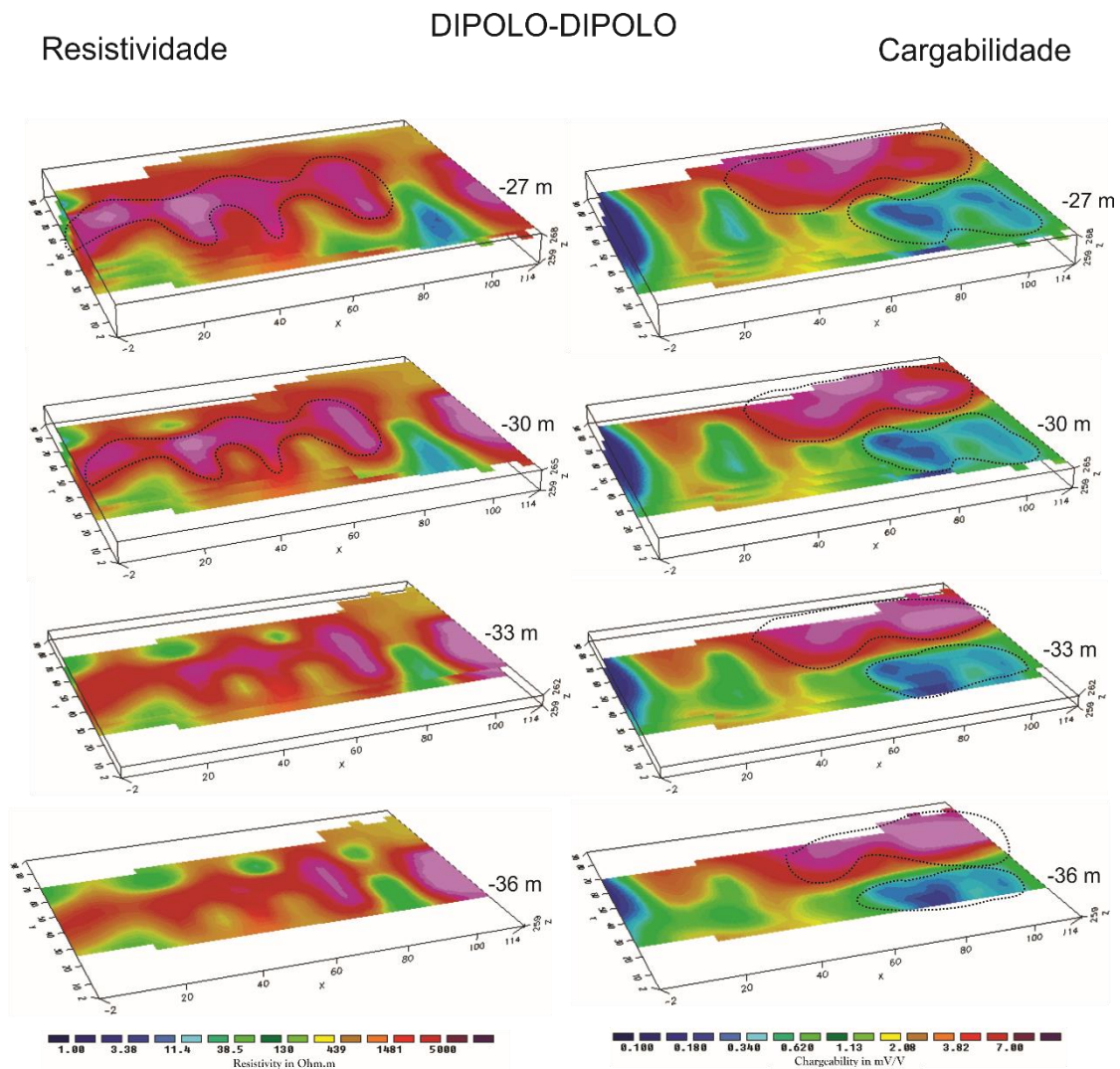


Figura 34 - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Dipolo-Dipolo, de 27 m de profundidade até 36 m. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas



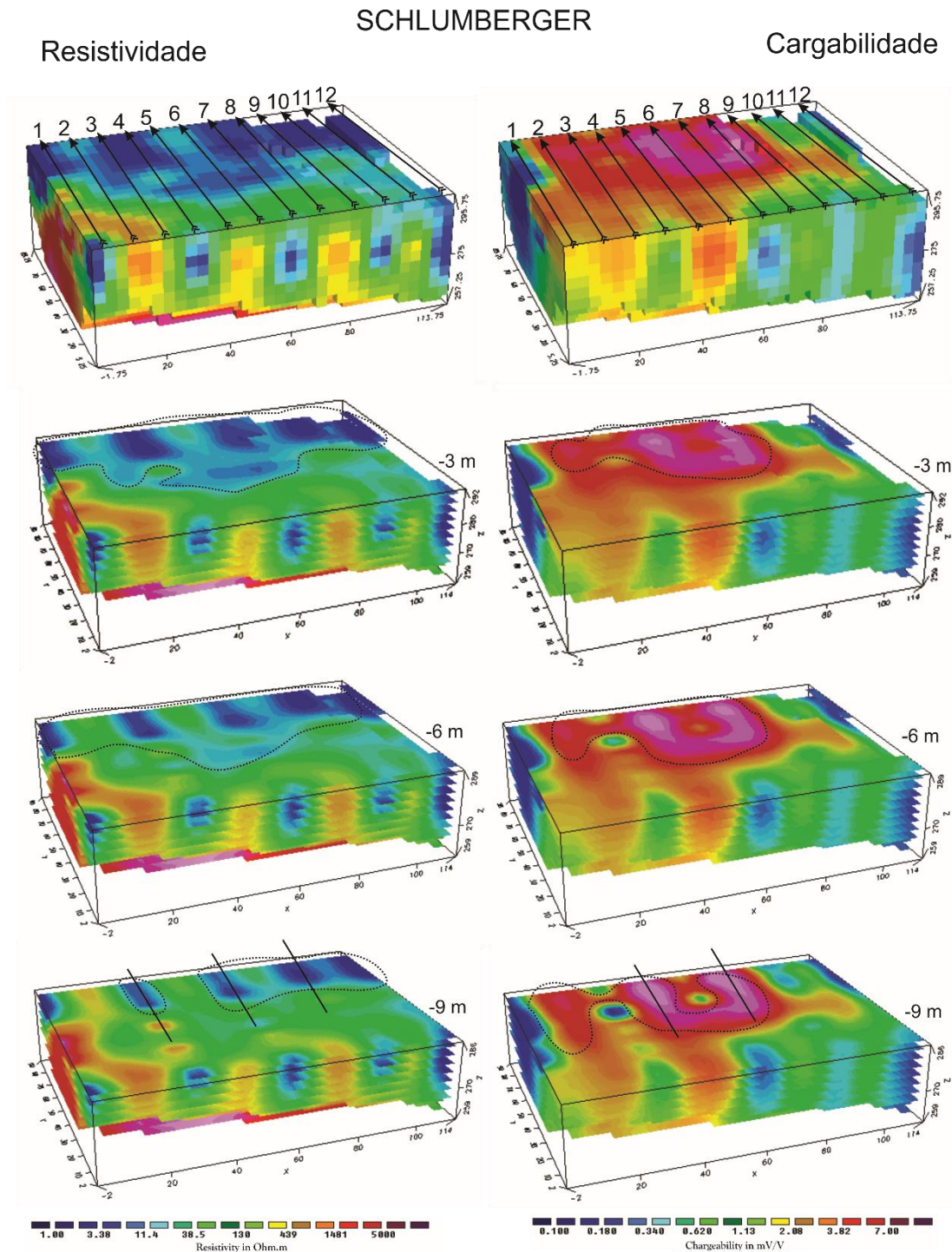
### 8.3.2 Cargabilidade

Os valores de cargabilidade apresentados em três dimensões ajudam a observar os locais de prováveis zonas de fraturas e sua interação com o ambiente e com os resíduos.

Valores baixos de cargabilidade (valores menores que 0,340 mV/V) podem representar zonas fraturadas preenchidas por água. Zonas de alta cargabilidade (valores maiores que 3,82 mV/V) representam os minerais passíveis de polarização, como o caso dos sulfetos.

Onde há valores de baixas resistividades e de baixas cargabilidade, são zonas com resíduos e água que infiltra no lixão, ou zonas fraturadas preenchidas por água (que pode ser derivada da contaminação do lixão). Essas zonas estão demarcadas em azul.

Figura 35 - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Schlumberger, da superfície até 9 m de profundidade. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas.



Entretanto, onde há valores de baixa resistividade e alta cargabilidade, é onde possivelmente há a presença de resíduos e de minerais de sulfetos. Isso ocorre devido ao sulfato que está presente na água que percola os resíduos, ser reduzido em condições com pouco ou nenhum oxigênio e se transforma em sulfetos metálicos.

Os valores de alta cargabilidade podem estar associados com os processos de biodegradação, que devido à presença de ácidos orgânicos da produção do chorume, modificou as condições iniciais do ambiente e ocasionou uma dissolução dos elementos químicos presentes nos resíduos sólidos que foram para a fase dissolvida e em um período com baixa umidade, reduziu em minerais de sulfetos (VAUDELETE et al. 2011).

Esse fenômeno de cristalização mineral, pode ocorrer devido a presença de diversos elementos presentes nos mais variados tipos de resíduos. Além de que o próprio substrato geológico pode conter minerais ferrosos (como a biotita), que são dissolvidas pelo lixiviado e liberam íons de ferro para a formação de óxidos, hidróxidos e sulfetos de ferro (do enxofre presente nos resíduos sólidos, principalmente orgânicos) (VELOSO et al. 2015).

É possível notar nas figuras 37 a 39 do arranjo Schlumberger que os valores de alta cargabilidade ocorrem até 36 metros. Essas zonas são possivelmente zonas fraturadas preenchidas por sulfetos que mineralizaram devido à percolação da água com excesso de sulfato. A grande quantidade de enxofre presente é devido a degradação dos resíduos com o decorrer do tempo, de acordo com a tabela criada por Farquhar (1989) e Birks & Eyles (1997).

Logo, é possível afirmar que desde o início da operação do lixão, essas zonas fraturadas possuíam sim a contaminação do lixiviado gerado; porém, com o tempo e atenuação natural, essas fraturas fecharam com minerais sulfetados. Essa afirmação pode ser baseada no que foi dito por Veloso et al. (2015), que em áreas de elevada cargabilidade, quando associadas à presença de contaminantes orgânicos e resíduos sólidos, indicam um antigo processo de biodegradação, e sugere que a área está em um estágio avançado de atenuação natural.

Figura 36 - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Schlumberger, de 12 m de profundidade até 24 m. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas

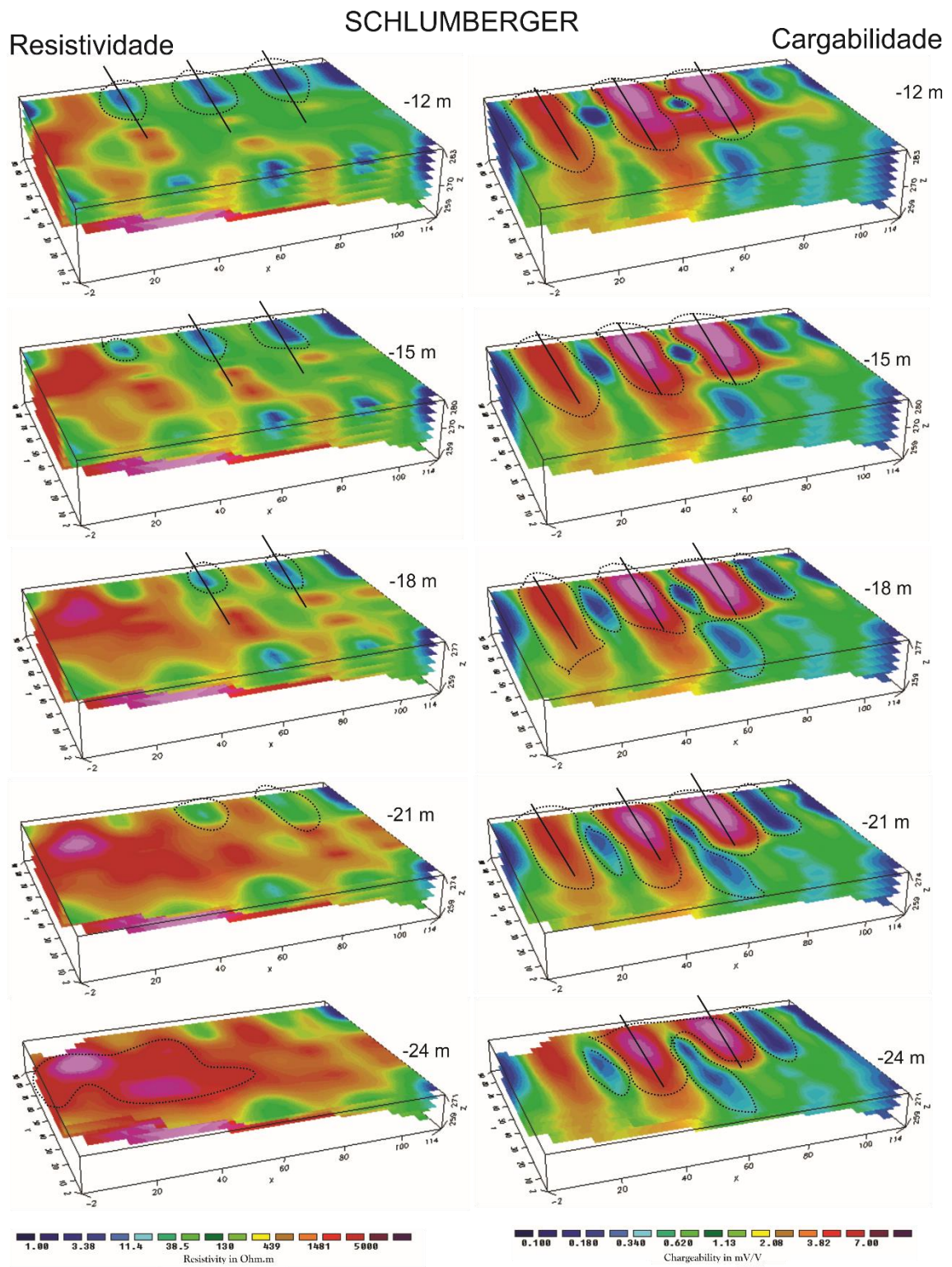
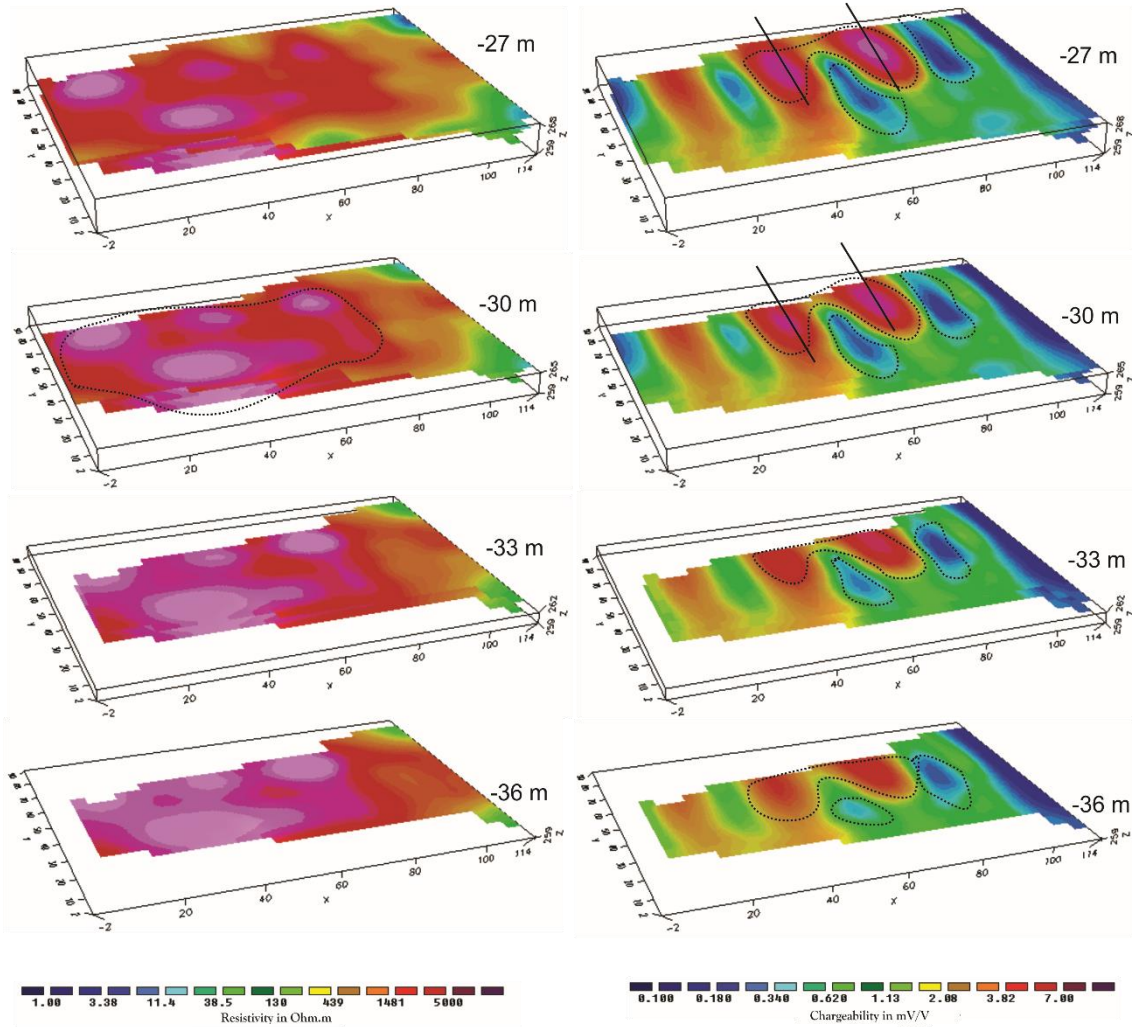


Figura 37 - Bloco 3D dos valores de resistividade e cargabilidade para o arranjo Schlumberger, de 27 m de profundidade até 36 m. Realce das zonas possivelmente sulfetadas e contaminadas, direção das zonas fraturadas

### SCHLUMBERGER

Resistividade

Cargabilidade



## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os danos ambientais decorrentes da disposição de lixo na área ocorreram desde o início da sua operação até depois do fechamento do empreendimento. Assim, não há como prever quando os efeitos do lixão deixarão de ser detectáveis, mas irão diminuir com o tempo.

Nesse contexto, a geofísica foi uma ferramenta essencial para obter informações sobre o contaminante e seu fluxo em subsuperfície. Com os perfis de resistividade e cargabilidade, foi possível obter informações que indicam a contaminação decorrente do lixão e suas dimensões.

Os perfis 2D ajudaram a constatar que fora da área do lixão, há a presença de possível contaminação (com valores baixos de resistividade). Foram constatadas possíveis zonas fraturadas com a presença de contaminantes, visto tanto pelos valores de resistividade mais baixos, quanto os valores de cargabilidade mais baixos.

O bloco pseudo 3D é uma forma de apresentação dos resultados que auxiliou a determinação do local que os resíduos estão dispostos, sua profundidade, suas zonas de percolação do lixiviado, dentro e fora do lixão e antigos locais que o lixiviado percolou.

Para os dois arranjos utilizados, com o aumento da profundidade, valores maiores de resistividade aparecem de oeste para leste, e ao considerar apenas os valores de alta resistividade, têm-se o formato de lavra por bancada, com até três bancadas de no máximo 5 metros de altura. Que é verificado através da diferença entre os valores de resistividade, e conseqüentemente uma variação de profundidade dos resíduos.

As zonas de alta cargabilidade no pseudo 3D são provavelmente zonas fraturadas por onde o lixiviado percola e contém minerais de enxofre (que é um subproduto da degradação da matéria orgânica). Com o passar do tempo e a presença da sazonalidade climática, propiciou um ambiente que varia de oxidante a redutor. Em períodos de alta umidade, com chuvas frequentes, há uma maior oxigenação e percolação de lixiviado por dezenas de metros de profundidade e, possivelmente, por áreas adjacentes ao lixão. Em períodos de clima seco, é onde o ambiente redutor forma e auxilia na formação de sulfetos

metálicos nas zonas de fratura, que ocasionou seu fechamento, o que justifica os altos valores de cargabilidade presentes.

Na área de estudos é possível visualizar resíduos por toda sua extensão, essa área do lixão coincide com as áreas de baixa resistividade e alta cargabilidade até 9 m de profundidade. Logo a formação de sulfetos entre os resíduos dispostos pode ter ocorrido durante esses anos de passivo ambiental.

A aplicação dos métodos da Eletroresistividade e da Polarização Induzida demonstraram ótimas ferramentas para indicar a presença de contaminação, que ainda existe, mas também processos de atenuação natural adiantado. No geral, o diagnóstico geofísico da área, contribuiu para obter informações que antes não haviam, a visualização em pseudo 3D permitiu ainda uma visão mais detalhada do estado do contaminante na área.

Em campo foi constatado a presença de resíduos sólidos nos taludes do lixão, devido a erosão de águas pluviais. Para evitar a exumação dos resíduos é necessário a conformação topográfica do terreno, cobrir com camadas de argila e por geomembranas, o que evita a infiltração das águas pluviais. Após essa impermeabilização, uma camada de solo orgânico e cobertura vegetal ajudaria na conformação da topografia. Pois quando não há a presença de água nos resíduos, inibe a formação de lixiviado.

A construção de canaletas laterais para o escoamento das águas pluviais também é indicada nesse tipo de remediação, pois evita erosão e o ravinamento. A construção de poços de monitoramento para a coleta de amostras de água e, conseqüentemente, análises químicas permitem monitorar os efeitos da atenuação natural e ter um controle dos parâmetros químicos e microbiológicos estabelecidos por lei.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. Biogas energy. Springer Science & Business Media, 2011

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. NBR 8.419. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. NBR 10157. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. Classificação dos Resíduos Sólidos. NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004

ALLABY, M. Encyclopedia of weather and climate. Facts on file, 2007

AHMED, S.; JAYAKUMAR, R.; SALIH, A. Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers, 2008

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BABINSKI, M.; CHEMALE JR.; F.; HARTMANN, L.A.; VAN SCHUMS, W.R.; SILVA, L.C. Juvenile accretion at 750-700 Ma in southern Brazil. Geology, v.24, pp 439-442. 1996

BAGGIOTTO, C.; DULAC, V. F.; ARAÚJO, R. K.; CRUZ, R. C.; CRUZ, J. C. Análise de Séries Temporais de Chuvas e Vazões da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã. SEPE Simpósio de Ensino, Pesquisa e Extensão. Porto Alegre. 2012

BICHET, Vincent; GRISEY, Elise; ALEYA, Lotfi. Spatial characterization of leachate plume using electrical resistivity tomography in a landfill composed of old and new cells (Belfort, France). Engineering Geology, v. 211, p. 61-73, 2016.

BIRKS, J.; EYLES, C. A. Leachate from landfill along the Niagara Escarpment. Environmental Geology of Urban Areas. Geological Association of Canada. Canada, p. 347-363, 1997.

BORBA, A.W.; LIMA, E.F.; VIGNOL-LELARG, M.L.M.; MIZUSAKI, A.M.P.; SPARREBERG, I.; BARROS, C.E. Significance of Late Paleozoic Fission-

track Ages in Volcanic Rocks from the Lavras Do Sul Region, Southernmost Brazil. *Gondwana Research*, v.6, n. 1, pp. 79-88. 2003

BORBA, A.W. Evolução geológica da "Bacia do Camaquã" (Neoproterozóico e Paleozóico Inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Geociências, 110p. Porto Alegre, RS-BR. 2006

BORTOLIN, J.R.M. & MALAGUTTI FILHO, W. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 15, n.4, p. 367-374, 2010.

BORTOLIN, José Ricardo Melges et al. Monitoramento temporal da pluma de contaminação no aterro de resíduos urbanos de Rio Claro (SP) por meio do método geofísico da eletrorresistividade. *Geologia USP: Serie Científica*, p. 99-113, 2012.

BRAGA, A.C. O. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos de captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. Livre Docência. Instituto de Geociência e Exatas, UNESP. Campus Rio Claro, SP. 123 p – 2006

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade. Vol. 1, Brasília – DF. 2009

BRASIL, Lei nº 7754, de 14 de abril de 1989. Estabelece medidas para proteção das florestas existentes nas nascentes dos rios e dá outras providências. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L7754.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L7754.htm) >. Acesso em 14 de dezembro. 2017

BRASIL, Lei nº 7.803, de 18 de julho de 1989. Altera a redação da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis nºs 6.535, de 15 de junho de 1978, e 7.511, de 7 de julho de 1986. Disponível em << [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L7803.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L7803.htm) >>. Acesso em 14 de dezembro. 2017

BRASIL, Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989. Dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências.. Disponível em <<

[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L7802.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L7802.htm) >>. Acesso em 14 de dezembro. 2017

BRASIL, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm) >. Acesso em: 18 jan. 2016.

BRASIL, Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em << [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm#art83](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm#art83) >>. Acesso em 14 de dezembro. 2017

CASADO, Ismael et al. Use of electrical tomography methods to determinate the extension and main migration routes of uncontrolled landfill leachates in fractured areas. *Science of the Total Environment*, v. 506, p. 546-553, 2015.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual de Gerenciamento de áreas contaminadas/ CETESB, GTZ. 2 ed. São Paulo. 2001. 389p.

CAVALCANTI, M. M.; BORGES, W. R.; STOLLBERG, R.; ROCHA, M. P.; CUNHA, L. S. D.; SEIMETZ, E. X.; OLIVERA E SOUSA, F. R. F. R. D. Levantamento geofísico (eletrorresistividade) nos limites do aterro controlado do Jokey Clube, Vila Estrutural, Brasília-DF. *Geociências (São Paulo)*, v. 33, n. 2, p. 298-313, 2014.

CHEMALE Jr., F; HARTMANN, L.A.; SILVA, L.C. Stratigraphy and Tectonism of Precambrian to Early Paleozoic Units In Southerne Brazil and Uruguay. *Excursion Guide Book. Acta Geologica Leopoldensia*. XVIII (42): 5 - 117. 1995

CHEMALE Jr., F. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: Hols, M., DeRos, L.F. (Eds.) *Geologia do Rio Grande do Sul*. CIGO-UFRGS, pp. 13-52. 2000

CHRISTENSEN, T. *Solid waste technology and management*. John Wiley & Sons, 2011

CLIMATE-DATA.ORG. Acessado em Setembro de 2017. << <https://pt.climate-data.org/location/313441/> >>. 2017

COMITÊ DE GERENCIAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAMAQUÃ. Disponível em: <http://www.comitecamaqua.com/>

CONAMA. Conselho Nacional De Meio Ambiente - Resolução nº 001/86. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da avaliação de impacto ambiental. Brasília. 1986

COSTA, A.F. Emprego do método da eletro-resistividade na caracterização da lixeira de Porto Velho-RO assentada em meio fraturado. 2008. Tese Doutorado Universidade Estadual Paulista (UNESP)

CPRM. Companhia De Pesquisa De Recursos Minerais. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Brasília: CPRM. 2003. Escrito por: BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M., & GONÇALVES, J. H.

CPRM. Companhia De Pesquisa De Recursos Minerais. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Brasília: 2000.

CPRM. Companhia De Pesquisa De Recursos Minerais. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Brasília: 2003

CPRM. Companhia De Pesquisa De Recursos Minerais. Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial. Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000. Brasília, 2005.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Mapa da Geodiversidade do Brasil: Influência da geologia dos grandes geossistemas no uso e ocupação dos terrenos. Brasília, 2006

CPRM. Companhia De Pesquisa De Recursos Minerais. Projeto SIG de Disponibilidade Hídrica. 2007. Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil. Sistema de Informações Geográficas de Disponibilidade Hídrica. Escala 1:2.500.000. Brasília, DF.

CPRM. Companhia De Pesquisa De Recursos Minerais. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Brasília, 2008.

DE CARLO, Lorenzo et al. Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method. Journal of Applied Geophysics, v. 98, p. 1-10, 2013.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources: an introduction. John Wiley & Sons, 2011

ECO-D. EcoD Básico: Lixão, Aterro controlado e Aterro sanitário. Disponível em << <http://www.ecodesenvolvimento.org/noticias/ecod-basico-lixao-aterro-controlado-e-aterro> >>.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª Edição. Brasília – DF, 2006

ESTADÃO. Lixões geram prejuízo de U\$ 370 mi para sistema de saúde. 2015 Disponível em: <http://ciencia.estadao.com.br/noticias/geral,lixoes-geram-custo-anual-de-us-370-milhoes-para-sistema-de-saude,1771302>

EVERETT, Mark E. Near-surface applied geophysics. Cambridge University Press, 2013.

FACHIN, S. J. S.; HUBER, F.; SHIRAIWA, S.; BORGES, W.R.; MIGLIORINI, R.B. Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume. Rev. Bras. Geof. [online]. 2006, vol.24, n.1, pp. 129-138. ISSN 0102-261X.

FANG, H. Y. Bacteria and tree root attack on landfill liners. In: Sarsby, R. W. Ed., Waste Disposal Landfill – GREEN'93. A. A. Balkema, Rotterdam, p. 419-426, 1995.

FARQUHAR, G. J. Leachate: production and characterization. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 16, n. 3, p. 317-325, 1989.

FEPAM - GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul 2015-2034. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2014.

FETTER, Charles Willard. Applied hydrogeology. Prentice hall, 2000.

FITTS, C.R. Groundwater science. Academic press, 2002.

FRAGOSO-CESAR; A.R.S. Tectônica de placas no ciclo brasileiro: as orogênias dos cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul. 1991. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FRANTZ, J.C.; MARQUES, J.C.; HARTMANN, L.A. Assessment of the Dom Feliciano Belt: some implications for the tectonic modeling of the Brasiliano Cycle in southern Brazil. In: Encontro sobre estratigrafia do Rio Grande do Sul: Escudo e Bacias. 2003

FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. Cemitérios como fonte potencial de contaminação das águas subterrâneas. Região de Cuiabá e Várzea Grande – MT – Brasília: Funasa, 2007. 118 p.: il.

GALLAS, J.D.F.; TAIOLI, F.; MALAGUTTI FILHO, W. Indiced polarization, resistivity, and self-potential: a case history of contamination evaluation due to landfill leakage. *Environment Earth Science*, v. 63, p 251-261, 2011

GALVÃO, T. D. L.; PORSANI, M. J. Aplicação do método da eletrorresistividade para determinação da contaminação em depósito de lixo do município de Alcobaça, estado da Bahia. II Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo. *Revista Águas Subterrâneas*, 2011.

GANDOLFO, OCB. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. 2007. 215 f. 2007. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geociências)–Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GASTAL, M.C.P. & LAFON, J.M. Gênese e Evolução dos Granitóides Metaluminosos de Afinidade Alcalina da Porção Oeste do Escudo Sul-riograndense: Geoquímica e Isótopos de Rb-Sr e Pb-Pb. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(1):29-44. 1998

GASTAL, M.C.; FERREIRA, F.J.F.; CUNHA, J.U.; ESMERLS, C.; KOESTER, E.; RAPOSO, M.I.B.; ROSSETTI, M.M.M. Alojamento do granito Lavras e a mineralização aurífera durante evolução de centro vulcano-plutônico pós-colisional, oeste do Escudo Sul-riograndense: dados geofísicos e estruturais. *Brazilian Journal of Geology*, vol. 45, n. 2, pp. 217-241. 2015

GOMES, L. P.; LANGE, L.; JUCÁ, J.; FERNANDES, F.; SILVA, S. Processos de monitoramento da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos. *Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Ênfase na Proteção de Corpos D'Água: Prevenção, Geração e Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários*. Coord.: Armando CASTILHOS Júnior. Projeto PROSAB IV. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

HARTMANN, L.A.; LEITE, J.A.D.; MCNAUGHTON, N.J; SANTOS, J.O.S. Deepest exposed crust of Brazil - SHRIP establishes three events. *Geology*, v. 27, pp 947-950. 1999

HARTMANN, L.A.; LEITE, J.A.D.; SILVA, L.C.; REMUS, M.V.D.; MCNAUGHTON, N.J.; GROVES, D.I.; FLETCHER, I.R.; SANTOS, J.O.S.; VASCONCELLOS, M.A.Z. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 47, pp 829-844. 2000

HISCOCK, K. M. *Hydrogeology, principles and practice*, Kevin M. Hiscock. 2005

HUNG, Y.T.; WANG, L.K.; SHAMMAS, N.K. (Ed.). *Handbook of environment and waste management: air and water pollution control*. World Scientific, 2012.

IBAM. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe. Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. São Paulo, 2009.

ISWA. International Solid Waste Association. Leachate Management. Landfill Training Workshop 7th September 2015. Disponível em: [http://iswa2015.org/assets/files/downloads/Leachate\\_Management\\_-\\_Landfill\\_training\\_ISWA\\_WGL\\_7\\_sep\\_2015.pdf](http://iswa2015.org/assets/files/downloads/Leachate_Management_-_Landfill_training_ISWA_WGL_7_sep_2015.pdf)

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An introduction to geophysical exploration. 2002.

KÖPPEN, W. Climatologia. México, Fundo de Cultura Econômica. 1931

LAGO, A.L. Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto-SP. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LEITE, J.A.D.; HARTMANN, L.A.; MCNAUGHTON, N.J.; CHEMALE JR., F. SHRIMP U/Pb zircon geochronology of Neoproterozoic juvenile and crustal-reworked terranes in southernmost Brazil. International Geology Reviews, v.40 (8), pp. 688-705. 1998

MILSON, J.; ERIKSEN, A. Field geophysics. John Wiley & Sons, 2011.

MORAIS, J. L.; SIRTORI, C.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional; Química Nova, São Paulo, v.29, n. 1, p. 20-23, 2006.

MORANDI, S.; GIL, I. C. (2000) - Tecnologia e ambiente. São Paulo: Codipart.

MOREIRA, C.A. Aplicação do método eletromagnético transiente em área contaminada sob atenuação natural. Rio Claro, 2005. 161p. Dissertação (Mestrado em Concentração em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

MOREIRA, C.A. Geofísica aplicada no monitoramento de área de disposição de resíduos sólidos domiciliares. Rio Claro, 2009. 167 p. Teses (Doutorado em Concentração em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

MOURA, H.P. & MALAGUTTI FILHO, W. Métodos da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro - SP. Geociências, v. 22, n. Especial, p. 129-139, 2003.

MUSSET, A. E.; KHAN, M. Aftab. Looking into the earth. An introduction to Geological, 2009

NARDI, L.V.S. Geochemistry and Petrology of the Lavras Granite Complex, RS - BR. Tese de Doutorado, Universidade de Londres, 268p. Londres. 1984

NASCIMENTO, J.C.F. Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NÓBREGA, C.C.; SOUZA, I.M.F.; ATHAYDE JÚNIOR, G.B.; GADELHA, C.L.M. Impacto de um lixão desativado na qualidade das águas subterrâneas locais. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Castellón - Espanha. 2008

NEVES, M.A. Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na bacia do rio Jundiaí (SP). Teses (Doutorado em Concentração em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2005

PHILLIPP, R.P.; MACHADO, R. Ocorrência e significado dos septos do embasamento encontrados nas suítes graníticas do Batólito de Pelotas, RS, Brasil. Pesquisas em Geociências, v.29, n. 1, pp 43-60. 2002

ROCHA, L. F; LA TERRA, E. F. Uso do Método TDEM (Eletromagnético no Domínio do Tempo) na Investigação de Pluma de Contaminação. In: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 2011.

RODRIGUES, F. S. F. Aplicação da ozonização e do reativo de Fenton como pré-tratamento de chorume com os objetivos de redução da toxicidade e do impacto no processo biológico. Rio de Janeiro, 2004, 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004

RAPOSO, M.I.B.; GASTAL, M.C.P. Emplacement mechanism of the main granite pluton of the Lavras do Sul intrusive complex, South Brazil, determined by magnetic anisotropies. Tectonophysics, vol. 466, pp. 18–31. 2009

REDDY, P. J. Municipal solid waste management. The Netherlands: CRC Press/Balkema. Retrieved October, v. 9, p. 2012, 2011

SARAIVA, F.A. Avaliação de Métodos Geofísicos no Comportamento Espacial de Plumas de Necrochorume. São Paulo, 2010, 103p. Tese (Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo.

SEMA. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/>

SHARMA, V.P. Environmental and Engineering Geophysics, 2<sup>o</sup> Edition United Kingdon, Cambridge University Press, 2002.

SILVA, R.W. DA. Aplicação do método da eletrorresistividade na investigação e mapeamento da contaminação por cemitérios - o exemplo do cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP. Rio Claro, 2008. 157 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

SILVA, R.W.S & MALAGUTTI FILHO, W. O emprego de métodos geofísicos na fase de investigação confirmatória em cemitérios contaminados. Engenharia Sanitária Ambiental, v.14, n.3, p327-336, 2009.

SMA - Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental - Resíduos Sólidos. São Paulo, 2010

SOLIANI JR.; E. Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP), 239p. São Paulo, SP-BR. 1986

SUERTEGARAY, D.M.; VERDUM, R.; BASSO, L.A. Rio Grande do Sul: Paisagens e Territórios em Transformação. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

TELFORD, W. M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. Applied geophysics. Cambridge university press, 1990.

TILDY, Péter et al. Time lapse 3D geoelectric measurements for monitoring of in-situ remediation. Journal of Applied Geophysics, v. 136, p. 99-113, 2017.

VAUDELET P, SCHMUTZ M, PESSEL M, FRANCESCHI M, GUERIN R, ATTEIA O, BLONDEL A, NGOMSEU C, GALAUP S, REJIBA F & BEGASSAT P. 2011. Mapping of contaminant plumes with geoelectrical methods. A case study in urban context. Journal of Applied Geophysics, 75: 738–751.

VELOSO, D.I.K.; MOREIRA, C.A.; CÔRTEZ, A.R.P. integration of geoelectrical methods in the diagnostic o fa diesel contaminated site in Santa Ernestina (SP). Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 33(3), 2015

VERÍSSIMO, L.S. A importância das águas subterrâneas para o desenvolvimento socioeconômico do eixo CRAJUBAR, Cariri Ocidental-Estado do Ceará. 1999. Tese de Doutorado.

ZANTA, V. M.; MARINHO, M.; LANGE, L.; PESSIN, N. Resíduos Sólidos, Saúde e Meio Ambiente: Impactos associados aos lixiviados de aterro sanitário. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Rio de Janeiro: ABES, p. 1-15, 2006.