



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E GEODINÂMICA

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DO LIXÃO MUNICIPAL DE  
PIRENÓPOLIS, GOIÁS.**

Dissertação de Mestrado nº146

**Kamylla de Lima Alves**

Brasília – DF  
2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E GEODINÂMICA

## **CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DO LIXÃO MUNICIPAL DE PIRENÓPOLIS, GOIÁS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas; Área de Concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente.

**Orientador:** Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges.

Brasília – DF

2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

## CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DO LIXÃO MUNICIPAL DE PIRENÓPOLIS, GOIÁS.

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges  
(Instituto de Geociências/UnB - Orientador)

---

Prof. Dr. Augusto Cesar Bittencourt Pires  
(Instituto de Geociências/UnB)

---

Prof. Dr. Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento  
(Faculdade UnB Planaltina)

Brasília – DF

2018

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Francisca e Gilmar, e ao meu irmão Deyvidi.

## AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que contribuíram e participaram direta e indiretamente deste ciclo acadêmico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador Welitom Borges por todo conhecimento, confiança e aprendizado durante esta caminhada.

Ao técnico do Laboratório de Geofísica Aplicada, Mendes, as alunas Maria Clara e Moara Matos pela ajuda na aquisição de dados – Go Girls!

A empresa Intergeo pela disponibilidade dos dados.

Aos meus pais, Gilmar Oliveira e Francisca Maria e ao meu irmão Deyvidi Lima por me darem todo apoio, força e principalmente por acreditarem em mim.

Às minhas companheiras de graduação, de estágio, de campo e de vida, Aline Pádua e Julia Lannes, em especial, Priscila Martins, por toda ajuda, mesmo que por telefone. Aos amigos Eduardo Seimetz, Pedro Vencovsky e por estarem sempre dispostos a ajudar!

Às minhas amigas Bruna Moreira, Jéssica Leite, Scarlett Ouyama,, Rayane Rosback e Tayze Alves por todo o apoio!

Ao meu companheiro Lucas por todo carinho, compreensão, parceria e força sempre.

Gratidão!

*“My mission in life is not merely to survive, but to thrive;  
and to do so with some passion, some compassion,  
some humor, and some style...”*

**Maya Angelou**

---

## **Resumo**

A destinação inadequada de resíduos sólidos em lixões e aterros gera impactos ambientais e problemas à saúde pública devido à contaminação do solo e da água pela percolação de chorume. A utilização de métodos geolétricos nos estudos de contaminação de solos e águas subterrâneas apresentam resultados satisfatórios tanto nas fases de avaliação preliminar, quanto nas fases de monitoramento e remediação. Este trabalho descreve os procedimentos de campo e apresenta os resultados de radar de penetração no solo (ground penetrating radar – GPR) e eletrorresistividade realizados na área de descarte de resíduos sólidos do município de Pirenópolis, Goiás. As investigações geofísicas objetivam a determinação de áreas impróprias para a disposição de resíduos sólidos, estimativa da espessura e composição do solo, localização de áreas com possíveis percolação de chorume, e determinação da profundidade do topo rochoso. O registro dos dados de GPR ocorreu com o sistema SIR3000, acoplado a uma antena blindada de 200 MHz, no interior e nos arredores do aterro. Com as seções de GPR identificaram-se padrões de reflexão típicos de solos, rochas, resíduos sólidos urbanos e materiais percolados por chorume. As investigações com o GPR mostram solos arenosos na região com espessuras entre 0,2 a 9 metros, o topo das rochas, foliações, e estruturas deformacionais (dobras e falhas). Na eletrorresistividade, foram adquiridas 22 seções com arranjo dipolo-dipolo, espaçamento de 10 metros dispostas no interior e nos limites da área do Lixão. Os resultados dos modelos de profundidade obtidos por inversão 2D dos dados elétricos caracterizam a pluma de contaminação através de zonas de baixas resistividades (abaixo de 100  $\Omega.m$ ). Os resultados confirmam que, apesar do local ser impróprio para a disposição de resíduos, o chorume não ultrapassa os limites do Lixão de Pirenópolis.

**Palavras-chave:** GPR, Resistividade elétrica, Lixão de Pirenópolis, Contaminação.

---

---

## **Abstract**

Inadequate disposal of solid waste in landfills generates environmental impacts and public health problems due to contamination of soil and water by leachate percolation. The use of geoelectric methods in studies of soil and groundwater contamination have satisfactory results both in the phases evaluation, as well as in the monitoring and remediation phases. This work describes the field procedures and presents the results of ground penetrating radar (GPR) and resistivity performed in the solid waste disposal area of the city of Pirenópolis, Goiás. Geophysical investigations aim at the determination of improper areas for solid waste disposal, estimation of soil thickness and composition, location of areas with possible leachate percolation, and determination of the depth of the bedrock. The GPR data was recorded with the SIR3000 system, coupled to a 200 MHz shielded antenna, in and around the embankment. The GPR sections identified patterns of reflection typical of soils, rocks, solid urban waste and leachate percolated materials. The investigations with the GPR show sandy soils in the region with thicknesses between 0.2 and 9 meters, the top of bedrock, foliations, and deformation structures (folds and faults). In the electroresistivity, 22 sections with dipole-dipole array were obtained, with spacing of 10 meters arranged in the interior and at the boundaries of the landfill. The results of the 2D inversion depth models of the electrical data characterize the plume of contamination through zones of low resistivities (below 100  $\Omega$ .m). The results confirm that although the site is not suitable for waste disposal, the manure does not exceed the limits of the Pirenópolis' landfill.

**Key words:** GPR, Electrical Resistivity, Landfill, contamination

---

---

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos .....	2
1.1.1	Objetivos específicos .....	2
1.2	Estrutura da dissertação.....	3
<b>2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>4</b>
2.1	Localização.....	4
2.2	Histórico do Lixão.....	5
2.3	Geologia .....	7
2.4	Pedologia.....	9
2.5	Hidrogeologia.....	11
2.6	Geomorfologia.....	12
2.7	Hidrografia .....	13
2.8	Topografia .....	14
2.9	Clima .....	16
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
3.1	Ground Penetrating Radar.....	18
3.1.1	Coeficiente de Reflexão.....	23
3.1.2	Profundidade de Penetração.....	23
3.1.3	Técnicas de aquisição.....	24
3.2	Eletrorresistividade.....	25
3.2.1	Propriedades elétricas dos materiais .....	25
3.2.2	Fluxo de corrente no solo.....	27
3.2.3	Resistividade aparente.....	29

---

---

3.2.4	Técnicas de aquisição.....	30
3.2.5	Arranjos de eletrodos .....	32
<b>4</b>	<b>ARTIGO 1 .....</b>	<b>34</b>
4.1	Introdução.....	36
4.1.1	Características geológicas da área.....	38
4.2	Metodologia.....	40
4.3	Resultados .....	44
4.4	Conclusões.....	53
4.5	Referências .....	54
<b>5</b>	<b>ARTIGO 2 .....</b>	<b>56</b>
5.1	Introdução.....	57
5.2	Metodologia.....	60
5.3	Resultados .....	63
5.4	Conclusões.....	71
5.5	Referências Bibliográficas .....	72
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>77</b>
6.1	Conclusões.....	77
6.2	Recomendações .....	78
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>82</b>

---

---

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2-1:</b> Localização da área onde desenvolveram-se as investigações geofísicas no Lixão de Pirenópolis/GO.....	4
<b>Figura 2-2:</b> Sequência de imagens ilustra a evolução temporal da área onde está instalado o Lixão de Pirenópolis. ....	6
<b>Figura 2-3:</b> Fotografias da área onde dispõem-se os resíduos sólidos urbanos do município de Pirenópolis, GO.....	7
<b>Figura 2-4:</b> Mapa geológico de parte do município de Pirenópolis, com destaque na área de estudo. ...	8
<b>Figura 2-5:</b> Mapa pedológico da região da área de estudo que evidencia a ocorrência de um latossolo vermelho na área do Lixão de Pirenópolis.....	10
<b>Figura 2-6:</b> Mapa hidrográfico da região da área de estudo que confirma a disposição do Lixão de Pirenópolis próximo a um dos afluentes do Córrego Pinheiro. ....	14
<b>Figura 2-7:</b> Perfil topográfico do Lixão de Pirenópolis no sentido noroeste-sudeste com visada para nordeste. ....	15
<b>Figura 2-8:</b> Mapa Topográfico da região da área de estudo. ....	15
<b>Figura 2-9:</b> Médias mensais de precipitação registradas na Estação Pirenópolis no período de 1987 a 2017. (Fonte: BDMEP - INMET).....	16
<b>Figura 2-10:</b> Médias mensais de temperatura registradas na Estação Pirenópolis no período de 1987 a 2017. (Fonte: BDMEP - INMET).....	17
Figura 3-1:a) Antena blindada de GPR indicando o comportamento das frentes de onda. b) Traço esquemático mostrando as chegadas das principais frente de onda do GPR (CAVALCANTI, 2013) ..	19
<b>Figura 3-2:</b> Distribuição de cargas por (a) corrente de condução; (b) corrente de deslocamento (ANNAN, 1996).....	19
<b>Figura 3-3:</b> Variação da velocidade e da atenuação pela frequência, evidenciando a frequência de transição entre a dispersão e a propagação da onda (JOL, 2009). ....	21
<b>Figura 3-4:</b> Esquema de sondagem de velocidade do tipo (a) CMP e do tipo (b)WARR. (BORGES, 2007) .....	24

---

---

<b>Figura 3-5:</b> Esquema de aquisição de dados no modo <i>common offset</i> , onde $S$ = espaçamento entre as antenas, e $n_x$ = espaçamento entre os traços (BORGES, 2007). .....	25
<b>Figura 3-6:</b> Parâmetros utilizados na definição da resistividade elétrica (KEAREY; BROOKS; HILL, 1986). .....	26
<b>Figura 3-7:</b> Intervalo de valores de resistividade elétrica de algumas rochas e materiais (LAGO, 2009) .....	27
<b>Figura 3-8:</b> Representação gráfica idealizada da direção do fluxo de corrente em um semi-espaço homogêneo (CANATA, 2015). .....	28
<b>Figura 3-9:</b> Representação do fluxo de corrente e o potencial associado no subsolo para quatro eletrodos em superfície (LAGO, 2009). .....	30
<b>Figura 3-10:</b> Técnicas de aquisição de dados de eletrorresistividade. a) Sondagem elétrica vertical - SEV. b) Caminhamento Elétrico - CE. c) Perfilagem Elétrica de Poço – PEP (BORGES, 2007). .....	31
<b>Figura 3-11:</b> Principais arranjos eletródicos e seus fatores geométricos (BORGES, 2007). .....	33
<b>Figura 4-1:</b> Mapa geológico da área com a localização das seções de GPR no Lixão Municipal de Pirenópolis-GO. .....	40
<b>Figura 4-2:</b> Fotos evidenciam a aquisição de dados de GPR com o equipamento SIR-3000 acoplado a uma antena blindada de 200 MHz, no interior e nos arredores do Lixão de Pirenópolis/GO. ....	41
<b>Figura 4-3:</b> Hipérboles de difração e respectivas velocidades das ondas eletromagnéticas identificadas em partes de radargramas obtidos na área do Lixão de Pirenópolis/GO. ....	43
<b>Figura 4-4:</b> Partes de seções de GPR com os padrões de reflexão (PRS e PRR) característicos da área do Lixão de Pirenópolis/GO. ....	44
<b>Figura 4-5:</b> Parte da seção LGPR2 com os padrões de reflexão (PRS e PRR) e destaque para refletores internos de PRR que indicam um dobramento nas rochas da área do Lixão de Pirenópolis/GO. ....	46
<b>Figura 4-6:</b> Parte da seção de LGPR5 com todos os padrões de reflexão (solo – PRS, rochas – PRR, lixo urbano – PRL, e percolado condutivo – PRC) identificados na área do Lixão de Pirenópolis/GO. ....	48
<b>Figura 4-7:</b> Seção de LGPR1 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas. ....	49

---

---

<b>Figura 4-8:</b> Seção de LGPR2 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas. Destaque para uma dobra entre a posição de 70 a 95 metros.....	50
<b>Figura 4-9:</b> Seção de LGPR3 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas. Destaque para uma estrutura sinforme com uma maior espessura de solo. ....	51
<b>Figura 4-10:</b> Seção de LGPR4 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas.....	52
<b>Figura 5-1:</b> Mapa geológico da área com a localização das seções de resistividade no Lixão Municipal de Pirenópolis-GO.....	59
<b>Figura 5-2:</b> Mapa com a localização das linhas de eletrorresistividade dentro da área do Lixão de Pirenópolis. ....	61
<b>Figura 5-3:</b> Gráfico indica o erro absoluto de resistividade elétrica após cada iteração no software Res2dinv.....	63
<b>Figura 5-4:</b> Modelo de resistividade elétrica da linha L22 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade. ....	64
<b>Figura 5-5:</b> Modelo de resistividade elétrica da linha L17 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade .....	65
<b>Figura 5-6:</b> Modelo de resistividade elétrica da linha L16 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade. ....	66
<b>Figura 5-7:</b> Seções de resistividade das linhas sobre a pilha de resíduos sólidos. Os menores valores de resistividade ( $< 100 \Omega.m$ ) definem a zona de percolação de chorume. ....	67
<b>Figura 5-8:</b> Modelo de resistividade elétrica da linha L05 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade. ....	68
<b>Figura 5-9:</b> Modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade evidenciando a correlação da posição da seção sobre a piscina de descarga de fossa séptica. ....	69
<b>Figura 5-10:</b> Comparação dos mapas de resistividade aparente em profundidade dos níveis 2, 3 e 5. ...	70
<b>Figura 5-11:</b> Mapa Topográfico da região da área de estudo. ....	70
<b>Figura 5-12:</b> Bloco 3D de resistividade da área com destaque para a anomalia de baixa resistividade (cor azul) interpretada como zona de percolação de chorume.....	71

---

---

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3-1:</b> Intervalos de valores de permissividade dielétrica ( $\epsilon r$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ) em alguns materiais (PORSANI, 1999).....	22
<b>Tabela 3-2:</b> Profundidade de investigação média ( $Z_e$ ) para o arranjo dipolo-dipolo (EDWARDS, 1977). .....	33
<b>Tabela 4-1:</b> Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos (NBR 16416; ABNT, 2015). .....	36

---

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{E}$	Intensidade do campo elétrico
$\vec{D}$	Densidade do momento dipolo
$\epsilon$	Permissividade dielétrica
$\epsilon_r$	Permissividade dielétrica relativa
$\epsilon_0$	Permissividade dielétrica do vácuo
$\vec{J}_D$	Corrente por deslocamento
$\vec{J}_C$	Corrente por condução
$\vec{J}_T$	Corrente total
$\sigma$	Condutividade elétrica
T	Tempo
$F_t$	Frequência de transição
$\omega$	Frequência angular
V	Velocidade
C	Velocidade de propagação da luz
A	Atenuação
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\vec{H}$	Campo magnético
$\vec{B}$	Indução magnética
Z	Impedância elétrica
$r_{gpr}$	Coefficiente de reflexão
$\Delta$	<i>Skin depth</i>
$\rho$	Resistividade
$\rho_a$	Resistividade aparente
R	Resistência
I	Corrente elétrica
$\vec{j}$	Densidade da corrente
$\delta V$	Diferença de potencial
K	Fator geométrico

---



## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

No Brasil o recolhimento e a destinação de resíduos sólidos urbanos é de responsabilidade das prefeituras municipais. A disposição destes resíduos ocorre em lixões, aterros controlados e aterros sanitários, sendo o lixão uma forma de disposição inadequada e sem controle ambiental. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no Brasil, 50,8% dos resíduos sólidos destinam-se a lixões, 22,5% a aterros controlados e 26,7% a aterros sanitários (IBGE, 2008). O que mostra a necessidade de trabalhos de pesquisa voltados ao estudo de impacto ambiental relacionado a lixões.

Na pesquisa de contaminação de subsolo e de água subterrânea, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) recomenda a utilização de métodos geoeletricos (NBR, 15935). Estes são constituídos pela eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar – GPR*), este último, utilizado para investigações mais rasas.

A utilização de métodos geoeletricos nos estudos de contaminação de solos e águas subterrâneas apresentam resultados satisfatórios tanto nas fases de avaliação preliminar, quanto nas fases de monitoramento e remediação. Os produtos finais minimizam custos de campo e apontam os locais mais adequados para a instalação de poços de monitoramento, além de apresentar informações geológicas e hidrogeológicas da área (BRAGA, 2016).

Os resultados de geofísica em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos mostram eficiência na identificação da pluma de contaminação de chorume (BORTOLIN, 2009; LOPES et al., 2012; CAVALCANTI, 2013; PARK et al., 2016), na determinação da espessura dos resíduos sólidos (OGILVY et al., 2002; LAGO; ELIS; GIACHETI, 2006), na caracterização geotécnica do aterro

(MOURA; MALAGUTTI FILHO, 2003; VELOZO, 2006; LAGO et al., 2009), na determinação de estruturas geológicas e hidrogeológicas (CHAMBERS et al., 2006; RUCKER; NOONAN; GREENWOOD, 2011).

O Ministério de Meio Ambiente, com a publicação da Lei n ° 12.305, instituiu que os municípios e os estados são responsáveis pela elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, que estabelece que os planos contemplem a recuperação e a valorização máxima dos diversos materiais, com a incorporação de soluções para a redução da disposição dos rejeitos ricos em matéria orgânica nos aterros, de forma a reduzir a geração de gases (MMA; ICLEI-BRASIL, 2012).

Neste contexto, a Prefeitura Municipal de Pirenópolis, no estado de Goiás, em parceria com o Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade de Brasília, iniciou a partir de 2015, as investigações geológicas, geofísicas e geotécnicas no Lixão municipal de Pirenópolis.

## **1.1 OBJETIVOS**

O objetivo geral do estudo é desenvolver o mapeamento geofísico de áreas potencialmente contaminadas pela percolação de chorume no Lixão de Pirenópolis, Goiás.

### **1.1.1 Objetivos específicos**

Com o projeto pretende-se:

- Desenvolver seções geoeletricas com o método da eletrorresistividade no interior e nas vizinhanças do lixão municipal de Pirenópolis, com o objetivo de identificar os padrões elétricos das camadas geotécnicas, e eventualmente padrões relacionados à percolação de chorume no subsolo;
- Analisar os padrões de reflexão de seções de GPR e tentar individualizar os resíduos sólidos na zona não saturada, determinar a espessura do solo e encontrar possíveis estruturas geológicas de percolação (falhas e fraturas);
- Elaborar um mapa com a posição espacial da possível pluma de contaminação.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos com objetividade no conteúdo abordado.

No Capítulo 1 apresenta-se uma abordagem sobre o problema da contaminação por chorume e os objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2 expõe-se a localização da área de estudo, um breve histórico de imagens da região de disposição de resíduos. Neste capítulo, também apresenta-se o contexto da geologia, geomorfologia, pedologia, e hidrogeologia da área.

No capítulo 3 mostram-se os princípios básicos dos métodos de *ground penetrating radar* e de eletrorresistividade.

O Capítulo 4 está organizado em formato de artigo intitulado “Estimativa de características geométricas de solos e rochas com radar de penetração no solo, na área de disposição de resíduos sólidos urbanos de Pirenópolis, GO”.

O Capítulo 5 também está estruturado em formato de artigo com o título “Aplicação de tomografia elétrica 2D no mapeamento da pluma de contaminação do Lixão de Pirenópolis, GO”.

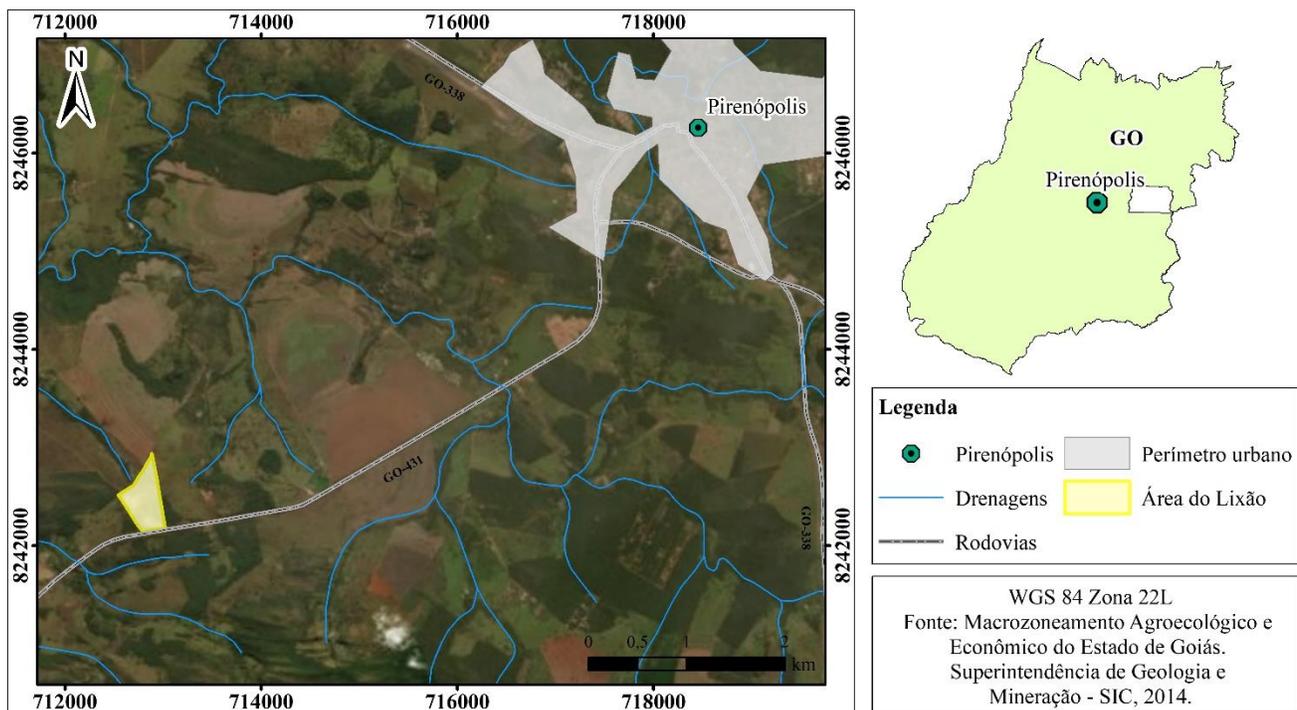
Enfim, as principais conclusões e recomendações do estudo são apresentadas no Capítulo 6.

## CAPÍTULO 2

### 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 2.1 LOCALIZAÇÃO

Os levantamentos geofísicos foram realizados no Lixão Municipal de Pirenópolis e redondezas, situado a 6 km a sudoeste da Cidade de Pirenópolis-GO, ao lado direito da rodovia GO-431, sentido Pirenópolis a Interlândia (**Figura 2-1**). Em função da disposição aleatória de resíduos sólidos ao longo de toda a área, as investigações restringiram-se às áreas livres de resíduos.



**Figura 2-1:** Localização da área onde desenvolveram-se as investigações geofísicas no Lixão de Pirenópolis/GO.

A área do Lixão tem um formato trapezoidal e mede aproximadamente 20 hectares, com perímetro total de 2 quilômetros. Ao sul encontra-se a rodovia GO-431. Ao norte encontra-se uma área de agricultura e também o afluente do córrego Pinheiro, a uma distância de 55 metros do limite do Lixão.

## **2.2 HISTÓRICO DO LIXÃO**

Não há nenhuma informação formal sobre o início do Lixão municipal de Pirenópolis. Ao analisar a série histórica de imagens aéreas da região, é possível esclarecer algumas questões quanto à disposição de resíduos.

No ano de 2005, nota-se que o lixo era depositado a céu aberto em trincheiras e há presença de uma piscina de descarga de fossa séptica, e escavação de outra piscina – aparentemente - sem nenhum controle de captação e procedimento de impermeabilidade

Em 2007 e 2011, observa-se que as trincheiras foram recobertas com camadas de solo/aterro e o descarte de lixo foi feito de maneira desordenada a oeste do limite do Lixão. Além disto, percebe-se que na imagem de 2011, a leste há uma nova piscina de descarte de fossa séptica.

Em 2012, as piscinas e as antigas trincheiras (apresentadas em 2005) começam a ser recobertas por vegetação.

No ano de 2016, os resíduos sólidos começam a ser depositados ao sul do lixão de maneira desordenada novamente.

Por fim, em 2017, uma nova área de descarte, à leste do limite do lixão.

Antes da definição da área, onde se adquiriram os dados, realizou-se uma análise de imagens de satélite de diferentes anos, e verificou-se in loco a região passível de aquisição (**Figura 2-2**).

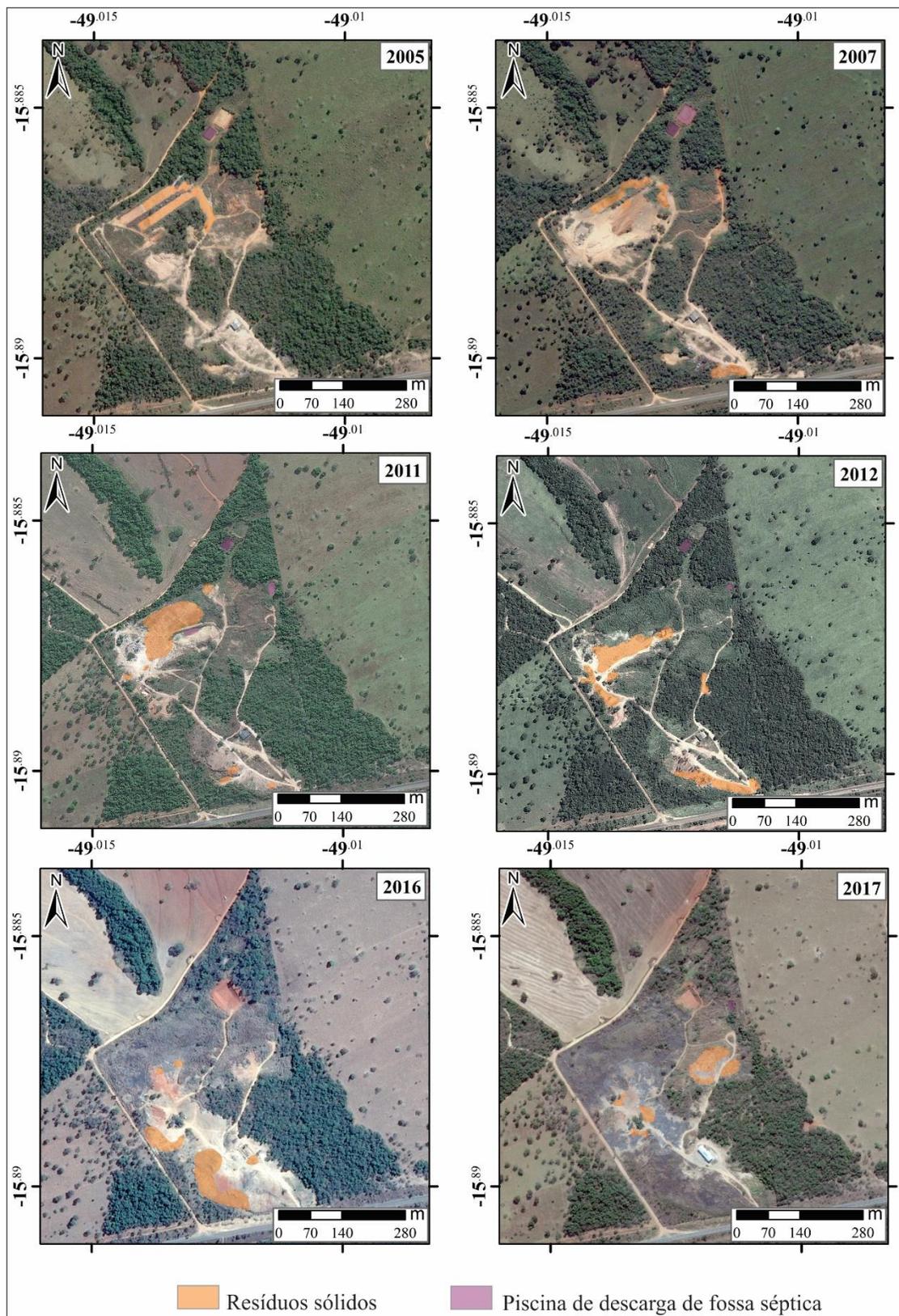


Figura 2-2: Sequência de imagens ilustra a evolução temporal da área onde está instalado o Lixão de Pirenópolis.

A área onde foi implantado o lixão era caracterizada anteriormente como um aterro sanitário controlado, porém, devido à falta de experiência dos trabalhadores e da fiscalização por parte das autoridades responsáveis, este tornou-se um lixão onde todos resíduos são depositados a céu aberto e de maneira inadequada (**Figura 2-3**). No local não existe nenhum tipo de controle na captação do chorume, ou dos gases gerados pela decomposição da matéria orgânica.



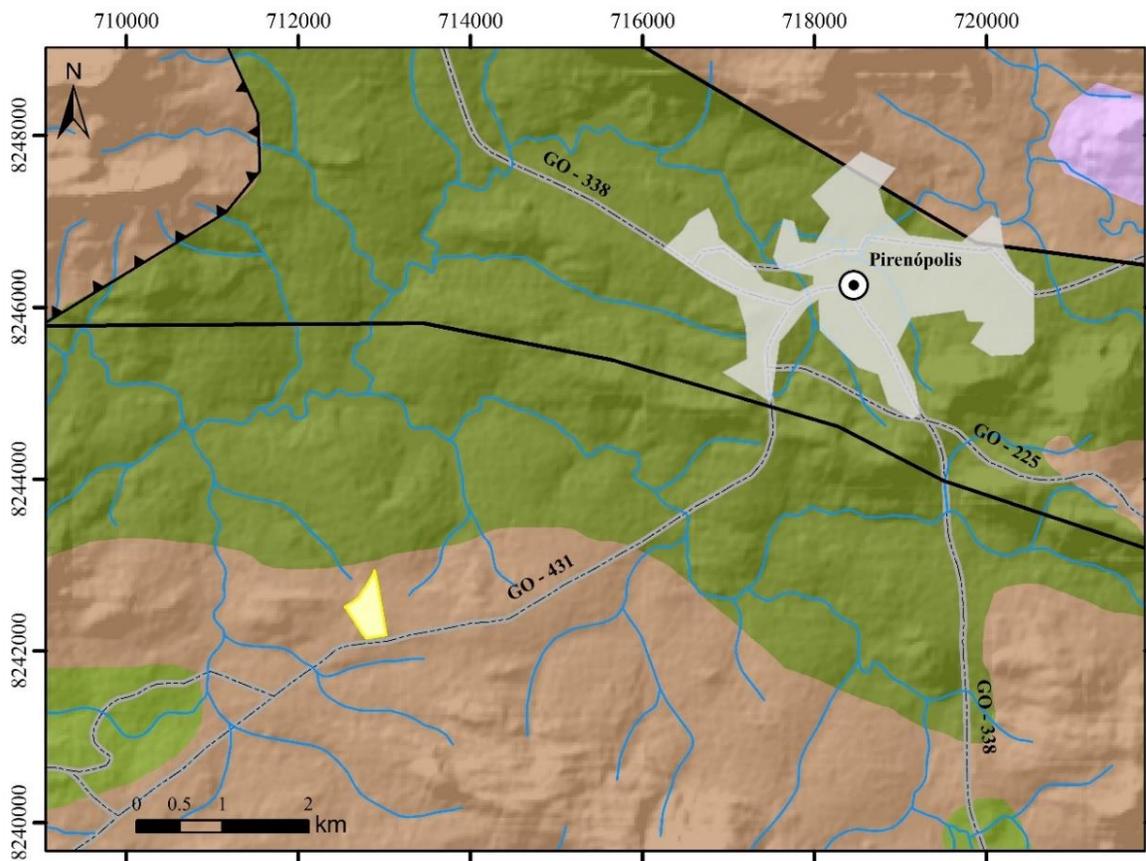
**Figura 2-3:** Fotografias da área onde dispõem-se os resíduos sólidos urbanos do município de Pirenópolis, GO.

### **2.3 GEOLOGIA**

As rochas desta região pertencem à unidade geotectônica Faixa Brasília (representada como um cinturão móvel, depositado e deformado na margem oeste do Cráton São Francisco, sobre um embasamento constituído por terrenos granito gnáissicos paleoproterozóicos, afetado por um sistema de dobramentos neoproterozóicos. Esta faixa está dividida em Zona Interna e Zona Externa. Entre as rochas que constituem a denominada Zona Interna estão as rochas do Grupo Araxá (MCT, 2006). Além deste, ocorrem também na região da área de estudo a unidade geológica Sequência Metavulcanossedimentar Rio do Peixe. A área de pesquisa – Lixão Municipal de Pirenópolis – encontra-se sobre a Unidade B do Grupo Araxá (**Figura 2-4**).

O Grupo Araxá, representado na área por sua Unidade B, é composto de quartzitos e granada-muscovita-biotita xistos, granada-clorita-muscovita xistos localmente piritosos, calci-clorita-biotita xistos por vezes, feldspáticos, calci-granada-clorita xistos e intercalações de hornblenda-granada xisto feldspático, grafita xisto e lentes de metacalcário e quartzitos micáceos (Barbosa, 1995 apud MME/CPRM; SIC/FUNMINERAL/GO, 2008, MCT, 2006). Esta unidade ocorre nos municípios de

Pirenópolis, Cocalzinho e Corumbá de Goiás e é a fonte de rocha quartzítica lavrada na região. Em Goiás, as rochas deste Grupo apresentam foliações de baixo ângulo na maioria das áreas de exposição (Almeida *et al.*, 2006).



**Legenda**

- ⊙ Pirenópolis
- Drenagens
- Rodovias
- ▭ Perímetro urbano
- ▭ Área do lixão

**Unidades geológicas**

- ▭ Grupo Canastra - Formação Chapada dos Pilões - Litofácies 2 - Fácies Quartzito
- ▭ Grupo Araxá - Unidade B
- ▭ Sequência metavulcanossedimentar Rio do Peixe - Unidade 1
- ▭ Sequência metavulcanossedimentar Rio do Peixe - Unidade 2

**Estruturas**

- Falha ou zona de cisalhamento
- ▲ Falha ou zona de cisalhamento compressional

WGS 84 Zona 22L  
 Fonte: Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Estado de Goiás. Superintendência de Geologia e Mineração - SIC, 2014.

**Figura 2-4:** Mapa geológico de parte do município de Pirenópolis, com destaque na área de estudo.

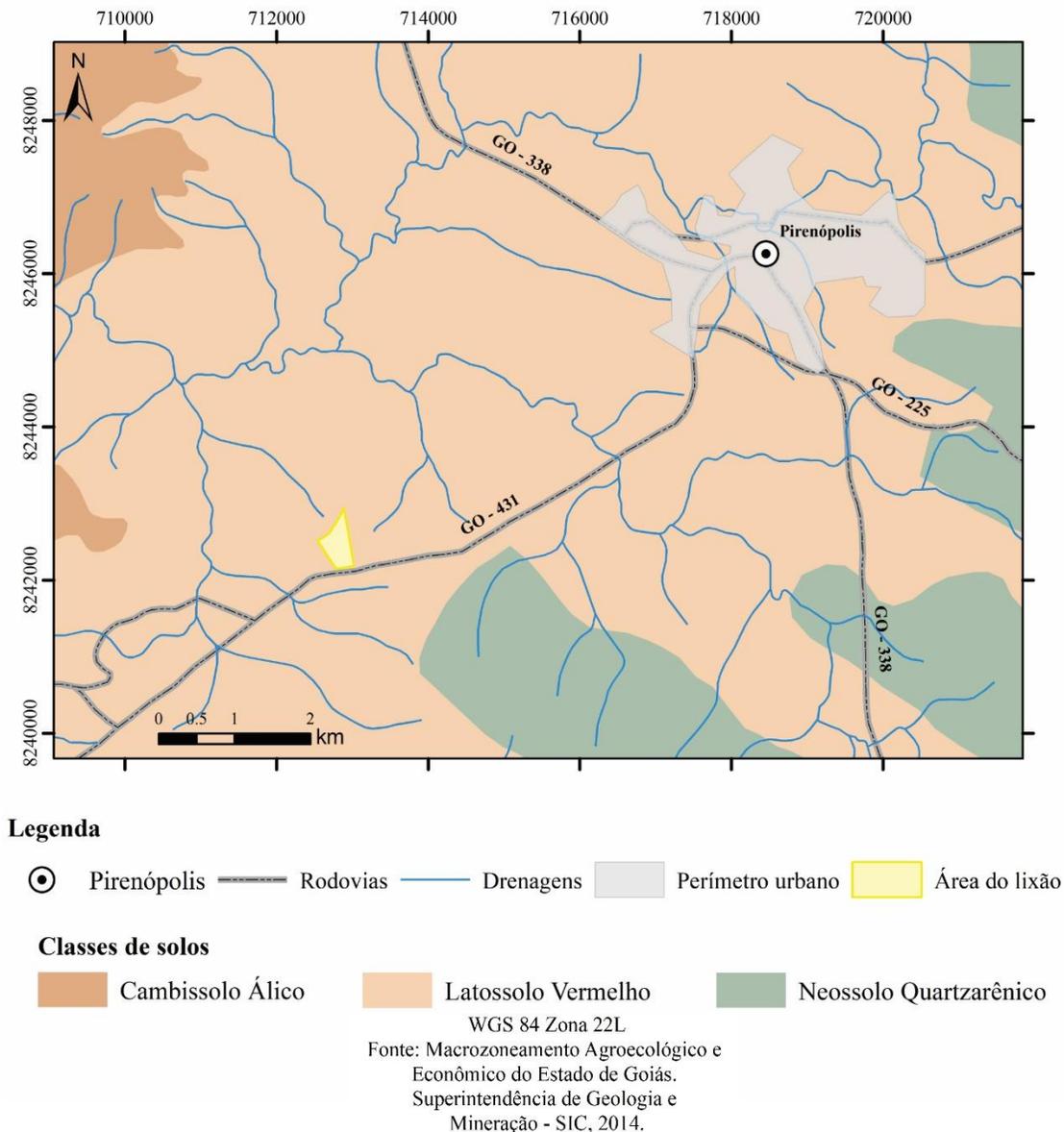
A Sequência Metavulcanossedimentar Rio do Peixe ocorre em duas pequenas faixas na porção W-SW no município de Pirenópolis. Esse conjunto metavulcanossedimentar, metamorfisado na fácies xisto verde a anfíbolito, é representado, por dois grupos: Unidade 1 e Unidade 2; A Unidade 2, sedimentar, é composta por quartzo xistos, quartzitos, xistos feldspáticos, micaxistos e anfíbolitos subordinados (Nascimento, 1985 apud MME/CPRM and SIC/FUNMINERAL/GO, 2008).

## **2.4 PEDOLOGIA**

Na região de estudo predominam três classes de solos, denominados de Latossolo Vermelho, Cambissolo e Neossolo Quartzarênico (**Figura 2-5**). O Lixão municipal de Pirenópolis está inserido na classe Latossolo Vermelho.

Os Latossolos Vermelhos possuem textura média a arenosa. O alto teor de areia e/ou estrutura granular e grumosa contribui para uma maior porosidade efetiva e conseqüente maior condutividade hidráulica. Em geral, são distróficos, com moderada capacidade de troca catiônica, o que resulta em baixa fertilidade natural. O uso intensivo observado para agricultura e pecuária está vinculado à facilidade de mecanização e à retenção de água nos horizontes edáficos no período das chuvas (ALMEIDA *et al.*, 2006).

Os Cambissolos são solos pouco evoluídos, geralmente pedregosos e, devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, suas características são bastante variáveis, mas em geral caracterizam-se por serem bem drenados, pouco profundos ou rasos, com teores elevados de silte. Devido a seu desenvolvimento ainda incipiente, as características destes solos estão em consonância com o material de origem. Devido à declividade e pedregosidade dos terrenos, estes solos são pouco utilizados para a agricultura mecanizada (EMBRAPA, 2013).



**Figura 2-5:** Mapa pedológico da região da área de estudo que evidencia a ocorrência de um latossolo vermelho na área do Lixão de Pirenópolis.

Os Neossolos Quartzarênicos apresentam textura arenosa, composição granulométrica nas classes texturais areia ou areia franca (micácea) e em toda a extensão do perfil são constituídos essencialmente por quartzo (> 95%), com ausência de minerais primários alteráveis (EMBRAPA, 2013). São solos bastante susceptíveis à erosão, sobretudo quando sujeitos a fluxo de água concentrado, que pode provocar a instalação de extensas voçorocas. São solos muito permeáveis, excessivamente drenados e geralmente sem estrutura desenvolvida. É comum observar-se um aumento de argila em profundidade, por vezes denotando caráter intermediário com latossolos. Em geral estes solos apresentam coloração creme

esbranquiçada, textura arenosa em grãos simples e são compostos predominantemente por quartzo (ALMEIDA *et al.*, 2006).

## **2.5 HIDROGEOLOGIA**

O Estado de Goiás possui regiões com elevado potencial hidrogeológico e outras com potencial extremamente reduzido. Destaca-se a região sudoeste do estado, que possui em seu subsolo rocha porosas e fraturadas com altíssimo potencial hídrico. Já as regiões nordeste e noroeste do estado apresentam os menores índices de disponibilidade de água subterrânea (ALMEIDA *et al.*, 2006).

A integração de dados geológicos, climáticos, geomorfológicos e pedológicos possibilitou definir dois grupos de reservatórios individualizados e denominados de Grupo dos Aquíferos Rasos/Freáticos e Grupo dos Aquíferos Profundos. O Grupo dos Aquíferos Rasos ou Freáticos é constituído exclusivamente por coberturas regolíticas (solo + saprolito), enquanto o Grupo dos Aquíferos Profundos inclui as unidades litológicas, que ocorrem com espessuras de dezenas a centenas de metros, podendo apresentar-se livres ou sob confinamento.

O Grupo de Aquíferos Profundos inclui diferentes domínios correspondentes aos diferentes tipos de porosidade predominante que podem variar de intergranular, fissural, dupla porosidade, físsuro-cárstica ou cárstica.

Os sistemas com porosidade fissural (fraturados) são constituídos por rochas magmáticas e metamórficas em diferentes graus, onde os processos tectônicos rúpteis foram responsáveis pela abertura de um retículo de fraturas ou fissuras que compõem o espaço eventualmente preenchido pela água. O potencial destes sistemas é vinculado à abertura, densidade e interconexão das fraturas.

A área de estudo está sobre o Sistema Aquífero Araxá (SAAX) compreende o conjunto litológico do Grupo Araxá, associado às Sequências Vulcanossedimentares situadas ao sul da Sintaxe dos Pirineus. Esta associação de unidades e tipos petrográficos é justificada em função da similaridade reológico-estrutural que estes materiais apresentam, e por se tratar predominantemente de micaxistos, com menor contribuição de quartzitos, anfibolitos e rochas ultramáficas. Em função da pequena porosidade observada nos tipos litológicos metapelíticos, que predominam e do baixo ângulo de mergulho da foliação, este sistema possui baixa vocação hidrogeológica, com média de vazões de 3,5 m<sup>3</sup>/h e elevada ocorrência de poços secos ou de vazão muito baixa.

Outras condições favoráveis deste sistema estão relacionadas aos quartzitos e quartzos xistos, os quais resultam em aquíferos com maior transmissividade e coeficiente de armazenamento, onde as médias de vazão superam 10m<sup>3</sup>/h, como é o caso de alguns poços na região de Pirenópolis. Este sistema é composto por aquíferos descontínuos, livres, anisotrópicos, com condutividade hidráulica muito baixa, em média de  $2,8 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s (ALMEIDA et al., 2006).

## **2.6 GEOMORFOLOGIA**

Latrubesse e Carvalho (2006) aplicaram uma classificação do tipo genética para o Estado de Goiás, organizada em vários níveis, sendo observadas as categorias de Sistemas Denudacionais e as de Sistemas Agradacionais, onde cada um destes sistemas pode envolver tanto processos de agradação como de denudação, contudo o critério de classificação foi determinado pela dominância das geoformas: erosivas (denudacionais) ou deposicionais (agradacionais).

Os Sistemas Denudacionais são aqueles onde predominam os processos erosivos. Subdividem-se em Sistemas Denudacionais com fraco ou imperceptível controle estrutural e com forte ou marcante controle estrutural, podendo, ainda ser divididos em Sistemas Denudacionais de dissecação, onde predomina erosão linear, ou de aplainamento, com predomínio de erosão laminar.

Na região abrangida pelo estudo ocorre a unidade morfológica Zona de Erosão Recuante (ZER). Conforme MCT (2006), as Superfícies Regionais de Aplainamento (SRA) encontram-se escalonadas em distintas cotas e estão geralmente delimitadas por escarpas de erosão. Por vezes, grandes engolfamentos marcam a erosão das unidades antigas desde um nível de base inferior (local ou regional), podendo estar associadas a redes de drenagem que evoluem por erosão recuante dissecando as superfícies de aplainamento e gerando outras SRAs. Estas áreas identificadas como ZER passam transicionalmente para a SRA, que atua como nível de base local.

À medida que uma ZER evolui, uma paisagem de morros e colinas pode se encontrar associada, iniciando um estágio evolutivo ainda incipiente para a geração de uma SRA situada numa cota inferior. À medida que a ZER avança e o recuo das vertentes evolui, Morros e Colinas podem ser identificados de forma mais desconexa da frente das escarpas (ZER). As colinas e os morros se destacam sobre uma superfície de extensão regional situada em uma cota inferior.

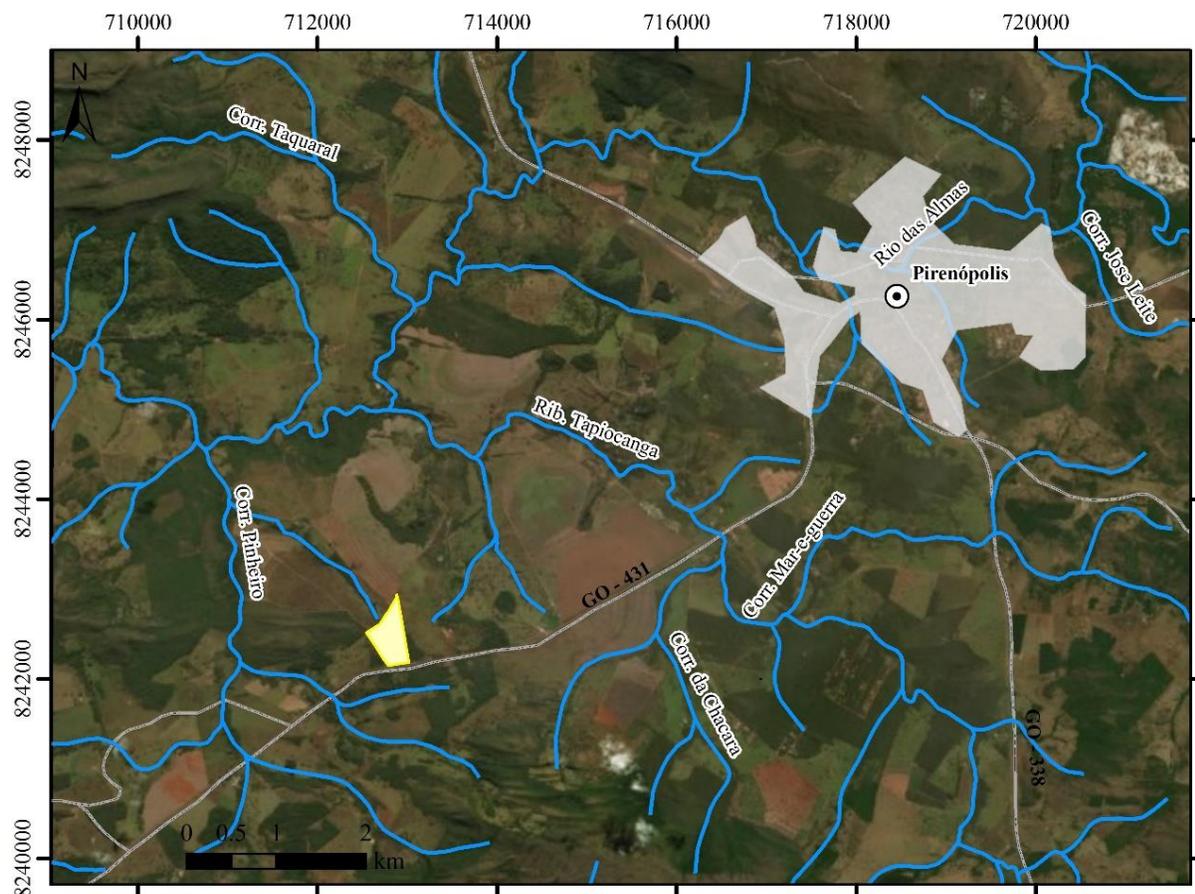
## **2.7 HIDROGRAFIA**

O estado de Goiás e o Distrito Federal possuem características peculiares em relação à hidrografia. Nesta área nascem drenagens alimentadoras de três importantes Regiões Hidrográficas(RH) do país: Araguaia/Tocantins; São Francisco e Paraná (Almeida *et al.*, 2006).

A rede hidrográfica da região, por diversos aspectos, está representada por dois rios de importância regional, o Corumbá e o das Almas. Além destes, drenam a área uma série de córregos e ribeirões de menor expressão (ribeirões do Inferno, Ponte Alta e Rasgão e córregos Capitão do Mato e Mata Gado).

O rio das Almas, de igual forma, nasce no divisor de águas das terras altas do Parque Estadual da Serra dos Pirineus, passa, logo em seguida, dentro dos limites do Município de Pirenópolis, antes de seguir rumo noroeste, integrando a região hidrográfica do Tocantins.

O curso d'água mais próximo da área de estudo – afluente do Córrego Pinheiros - está ao norte, a 55 metros de distância do limite do lixão (**Figura 2-6**).



**Legenda**

- ⊙ Pirenópolis
- ▭ Perímetro urbano
- Drenagens
- Rodovias
- ▭ Área do lixão

WGS 84 Zona 22L

Fonte: Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Estado de Goiás. Superintendência de Geologia e Mineração - SIC, 2014.

**Figura 2-6:** Mapa hidrográfico da região da área de estudo que confirma a disposição do Lixão de Pirenópolis próximo a um dos afluentes do Córrego Pinheiro.

**2.8 TOPOGRAFIA**

Na **Figura 2-7** é observado o perfil topográfico da área do Lixão de Pirenópolis, no sentido noroeste-sudeste com visada para nordeste. Neste perfil, percebe-se um rebaixamento extenso na direção noroeste, com gradiente preferencial de escoamento, onde se encontra o afluente do córrego Pinheiros. A sudeste, encontra-se um alto topográfico, com um desnível médio de 22 metros (**Figura 2-8**).

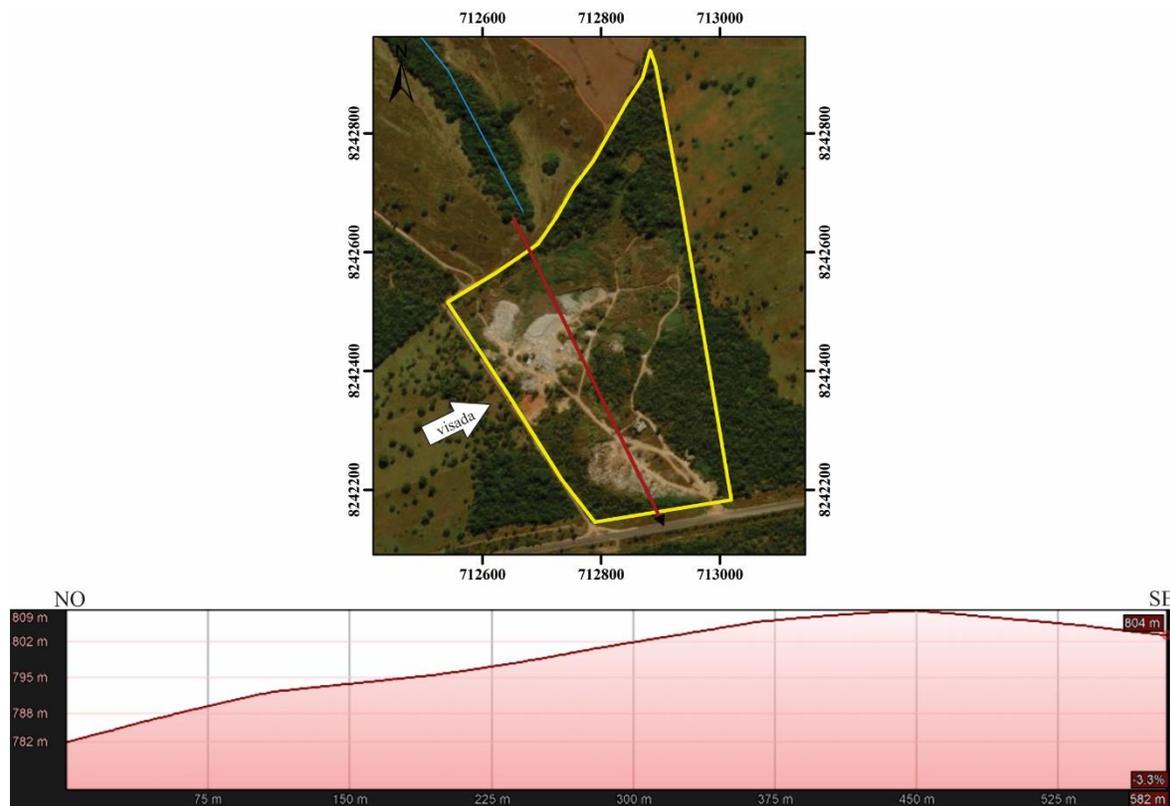


Figura 2-7: Perfil topográfico do Lixão de Pirenópolis no sentido noroeste-sudeste com visada para nordeste.

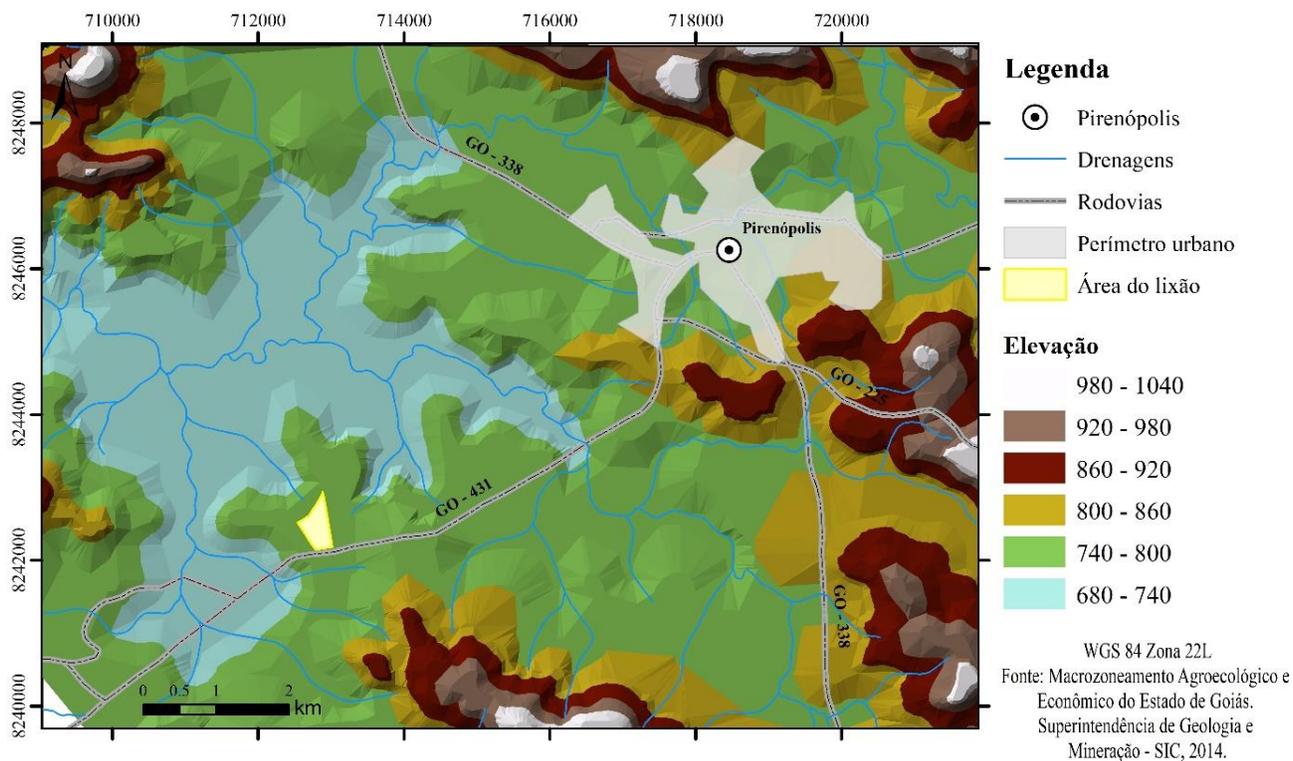
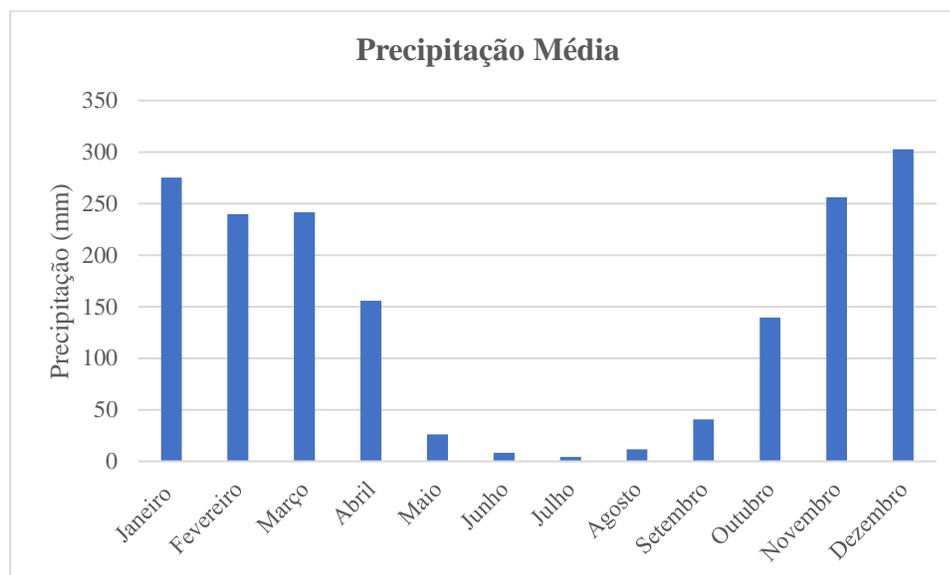


Figura 2-8: Mapa Topográfico da região da área de estudo.

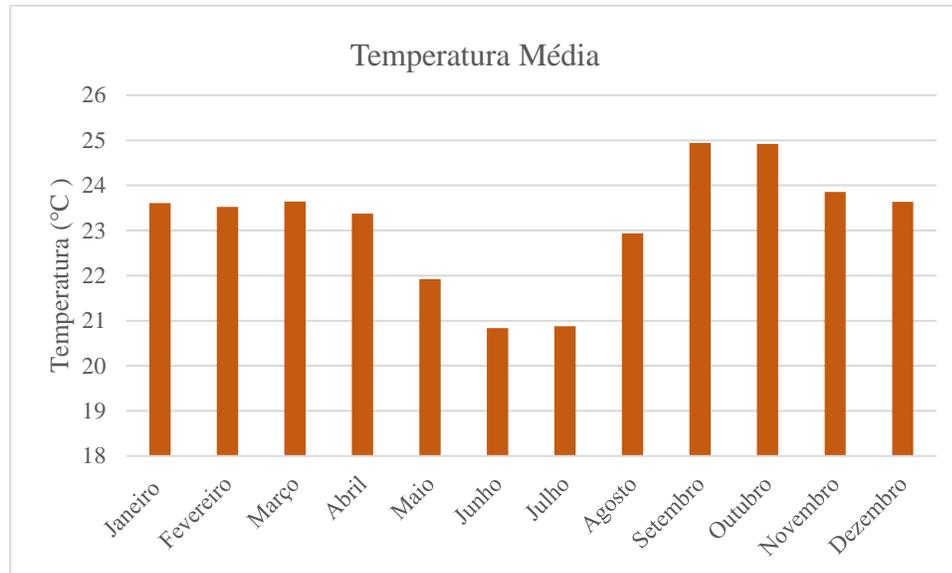
## 2.9 CLIMA

O clima no estado de Goiás é caracterizado por duas estações bem definidas: uma com altos índices pluviométricos (outubro a abril), onde ocorrem 95% das precipitações anuais e outra com baixos índices pluviométricos (maio a setembro (**Figura 2-9**)).



**Figura 2-9:** Médias mensais de precipitação registradas na Estação Pirenópolis no período de 1987 a 2017. (Fonte: BDMEP - INMET)

Os meses de setembro e outubro apresentam os maiores índices térmicos, alcançando valores médios máximos em torno de 25°C, enquanto que as médias mensais das temperaturas mínimas do ar indicam que os meses de junho e julho são os mais frios, com valores em torno de 21°C (**Figura 2-10**).



**Figura 2-10:** Médias mensais de temperatura registradas na Estação Pirenópolis no período de 1987 a 2017. (Fonte: BDMEP - INMET).

## CAPÍTULO 3

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo descrevem-se as fundamentações teóricas dos métodos *ground penetrating radar* e da eletrorresistividade.

#### 3.1 GROUND PENETRATING RADAR

O GPR é um método eletromagnético que utiliza ondas de rádio em altas frequências (10 MHz a 2500 MHz) para localizar estruturas e feições geológicas rasas em subsuperfície ou encontrar objetos enterrados pelo homem (PORSANI, 1999). O princípio físico e a metodologia de aquisição de dados GPR são semelhantes à reflexão sísmica, com exceção de que o GPR é fundamentado na reflexão de ondas eletromagnéticas (DAVIS; ANNAN, 1989).

O método consiste na transmissão de ondas EM radiadas para o subsolo por uma antena transmissora colocada na superfície. A propagação do sinal EM depende das propriedades elétricas dos materiais e da frequência do sinal transmitido, as quais são diretamente relacionadas ao conteúdo de água (estado líquido) presente no solo (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980). Desta forma, quanto maior o conteúdo de água maior será a atenuação do sinal da onda EM, e vice-versa. As variações das propriedades elétricas em subsuperfície fazem com que parte do sinal seja refletido. As ondas de radar refletidas e difratadas em subsuperfície são recebidas através de outra antena, denominada de antena receptora, também colocada na superfície da Terra (**Figura 3-1**).

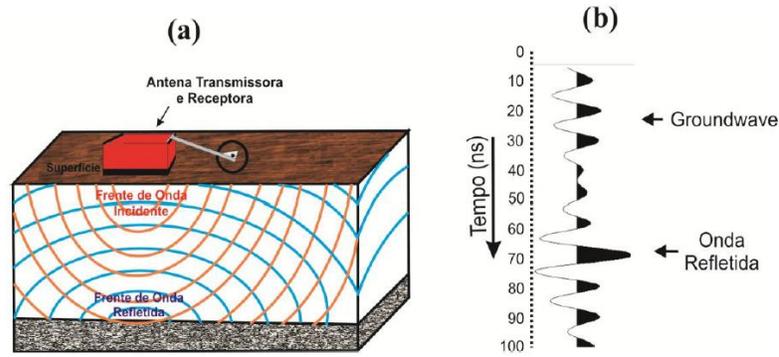


Figura 3-1:a) Antena blindada de GPR indicando o comportamento das frentes de onda. b) Traço esquemático mostrando as chegadas das principais frente de onda do GPR (CAVALCANTI, 2013)

Segundo KELLER (1987), a ocorrência de um campo elétrico ( $\vec{E}$ ) em um terreno provoca a movimentação de cargas elétricas em subsuperfície. Existem dois tipos de corrente: corrente de condução e de deslocamento (Figura 3-2).

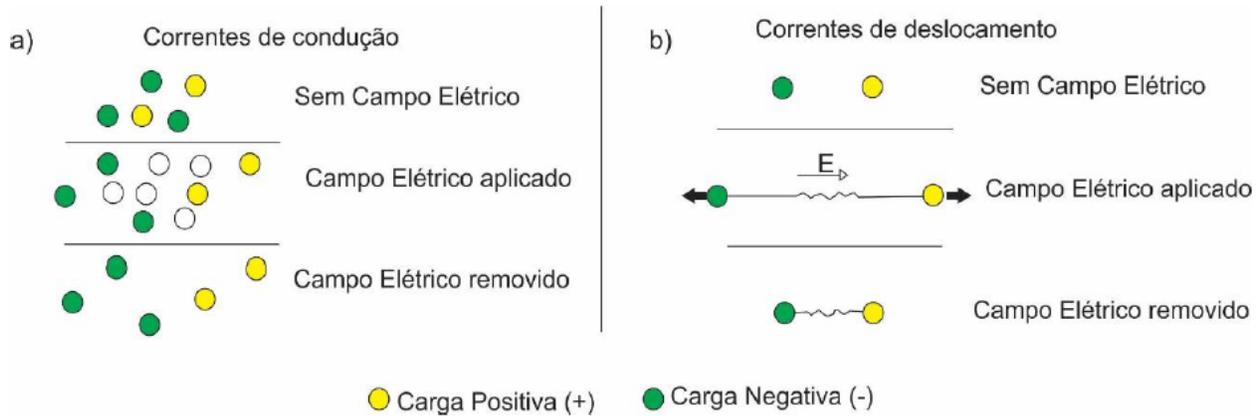


Figura 3-2: Distribuição de cargas por (a) corrente de condução; (b) corrente de deslocamento (ANNAN, 1996).

No momento em que se aplica um campo elétrico ( $\vec{E}$ ) em um material, inicia-se a distribuição do momento dipolo e no qual a separação de cargas é descrita em termos da densidade do momento dipolo (Equação 3.1), em que  $\epsilon$  é a permissividade dielétrica, a propriedade que descreve como o campo elétrico interage com o meio

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \tag{Eq 3.1}$$

A ocorrência do momento dipolo em um material está associada à movimentação de cargas, e, por conseguinte há ocorrência de dois tipos de correntes elétricas. A corrente por deslocamento ( $\vec{J}_D$ ), que é dada pela razão da variação da densidade de momento dipolo no tempo (Equação 3.2).

$$\vec{J}_D = \frac{d\vec{D}}{dt} \therefore \vec{J}_D = \frac{d(\epsilon \cdot \vec{E})}{dt} \rightarrow \vec{J}_D = \epsilon \cdot \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (Eq. 3.2)$$

E a corrente por condução ( $\vec{J}_C$ ), produto entre a condutividade( $\sigma$ ) e o campo elétrico, definida na Equação 3.3:

$$\vec{J}_C = \sigma \cdot \vec{E} \quad (Eq. 3.3)$$

A corrente total ( $\vec{J}_T$ ) que flui em um material natural é uma resposta à aplicação de um campo elétrico e a composição das correntes de deslocamento e de condução (Equação 3.4).

$$\vec{J}_T = \epsilon \cdot \frac{d\vec{E}}{dt} + \sigma \cdot \vec{E} \quad (Eq. 3.4)$$

Em estruturas com condutividade e permissividade dielétricas constantes, existe uma frequência de transição ( $F_t$ ), na qual  $\vec{J}_C = \vec{J}_D$ . Para a ocorrência de frequências que estejam acima da frequência de transição ( $F_t$ ), a corrente por deslocamento ( $\vec{J}_D$ ) é dominante (ANNAN, 1996). As correntes de deslocamento se caracterizam por se propagarem como onda com pouca ou nenhuma dispersão de frequência angular de excitação ( $\omega$ ) dada por:

$$\omega = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (Eq. 3.5)$$

Em um material simples, a frequência de transição ( $F_t$ ) é definida na Equação 3.6:

$$F_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (Eq. 3.6)$$

As frequências que ocorrem abaixo da  $F_t$ , a corrente por condução ( $\vec{J}_C$ ) é predominante e a energia se difunde para o material.

Quando as frequências são superiores à ( $F_t$ ), a propagação das ondas está relacionada com a velocidade ( $v$ ) e a atenuação ( $\alpha$ ) das ondas, como apresentada na Equação 3.7 e na Equação 3.8 (**Figura 3-3**; JOL, 2009).

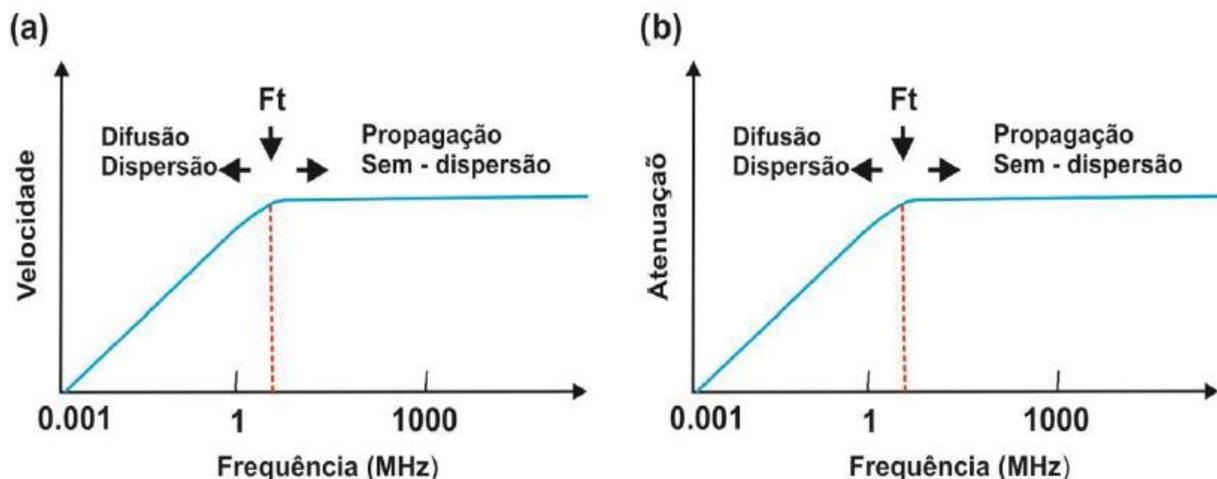
$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (Eq. 3.7)$$

$$\alpha = 1.64 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

nde,  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$  = permissividade dielétrica relativa; em que  $\epsilon$  é a permissividade dielétrica do material (F/m) e  $\epsilon_0$  a permissividade dielétrica do vácuo ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m)

Esses dois parâmetros são diretamente influenciados pela permissividade dielétrica ( $\epsilon_r$ ), que atua na velocidade de propagação( $v$ ), e pela condutividade elétrica( $\sigma$ ), que interfere na atenuação das ondas( $\alpha$ ) (ANNAN, 1996).

Nas altas frequências, acima da  $F_t$ , todas as componentes de frequência exibem à mesma velocidade e sofrem a mesma atenuação (**Figura 3.3**), correspondendo a faixa mais adequada para o GPR (ANNAN, 1996).



**Figura 3-3:** Variação da velocidade e da atenuação pela frequência, evidenciando a frequência de transição entre a dispersão e a propagação da onda (JOL, 2009).

Na **Tabela 3-1** constam a permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) e a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) de alguns materiais comuns nos estados seco e saturado.

**Tabela 3-1:** Intervalos de valores de permissividade dielétrica ( $\epsilon_r$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ) em alguns materiais (PORSANI, 1999).

<b>Materiais</b>	$\epsilon_r$	$\sigma$ (mS/m)
Ar	1	0
Areia seca e cascalho	2 - 6	0,01
Areia saturada	20 - 30	0,1 - 1
Argila	5	2
Argila saturada	40	1000
Folhelho e siltito	5	1
Solo arenoso	2,6	0,14
Solo arenoso saturado	25	6,9
Solo argiloso	2,4	0,27
Solo argiloso saturado	15	50
Água destilada	81	0,01
Água fresca	81	0,5
Água do mar	81	3000
Silte saturado	10	1 - 10
Arenito	20 - 30	40
Siltito	30	100
Folhelho	7	100

A terceira propriedade eletromagnética é a permeabilidade magnética ( $\mu$ ), uma medida da capacidade dos momentos dipolares presentes nos átomos de, ao ser submetido a campo magnético externo, serem movidos de sua orientação e alinharem-se com o campo aplicado.

A passagem da corrente elétrica no meio produz uma excitação magnética denominada de campo magnético  $\vec{H}$  que origina uma indução magnética  $\vec{B}$  (**Equação 3.9**) dada por:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

onde a permeabilidade magnética do meio é a constante de proporcionalidade entre esses dois meios. A permeabilidade magnética raramente tem importância nas aplicações do GPR. Desta forma, ela é assumida como sendo igual à permeabilidade magnética do vácuo ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m).

### 3.1.1 Coeficiente de Reflexão

Em estudos de GPR, supõe-se que as ondas EM se propagam com uma incidência normal às interfaces das camadas (ANNAN, 1996). Estas camadas possuem diferentes propriedades elétricas que podem causar uma forte impedância nas interfaces determinando assim a quantidade do sinal que deverá ser refletida, expressa pelo coeficiente de reflexão (WARD; HOHMANN, 1988).

A amplitude do coeficiente de reflexão pode ser descrita em termos da impedância elétrica ( $Z$ ). A impedância ( $Z$ ) é definida pela relação entre o campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e o campo magnético ( $\vec{H}$ ), ortogonais entre si (BORGES, 2002).

$$Z = \frac{E}{H} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Em uma incidência normal, a amplitude do coeficiente de reflexão ( $r_{gpr}$ ), pode ser escrita pela seguinte equação:

$$r_{gpr} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

sendo que  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  as constantes dielétricas das camadas 1 e 2.

### 3.1.2 Profundidade de Penetração

A profundidade de investigação do GPR é influenciada pela atenuação da energia da onda EM, durante a propagação. (OLHOEFT, 2000) relata quatro tipos de perdas por atenuação: espalhamento geométrico, condução elétrica, polarização e perda por difusão.

A atenuação do sinal acontece na razão de 1/e do valor inicial (37%) com a profundidade, sendo inversamente proporcional à atenuação. Essa relação é conhecida como *skin depth* ( $\delta$ ). Em materiais com alta condutividade elétrica, tem-se um baixo valor de  $\delta$ , enquanto que, em materiais com baixa condutividade elétrica ocorre um aumento do  $\delta$ , proporcionando uma maior profundidade de investigação (REYNOLDS, 1997).

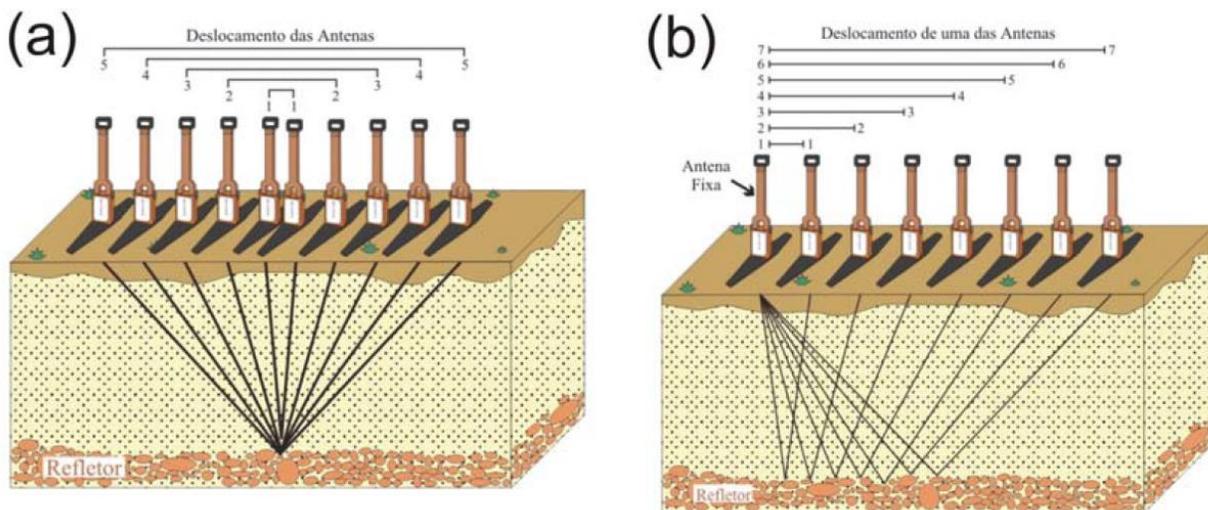
A profundidade de investigação e a resolução do GPR variam de acordo com a frequência da antena. Quanto maior a frequência, maior a resolução vertical e menor a profundidade de investigação (

### 3.1.3 Técnicas de aquisição

As técnicas de aquisição do GPR estão relacionadas à posição das antenas transmissora e receptora e podem ser de três tipos: transiluminação, sondagens de velocidade (*common midpoint-CMP* e *wide angle reflection and refraction -WARR*) e perfis de reflexão (*common offset -CO*)

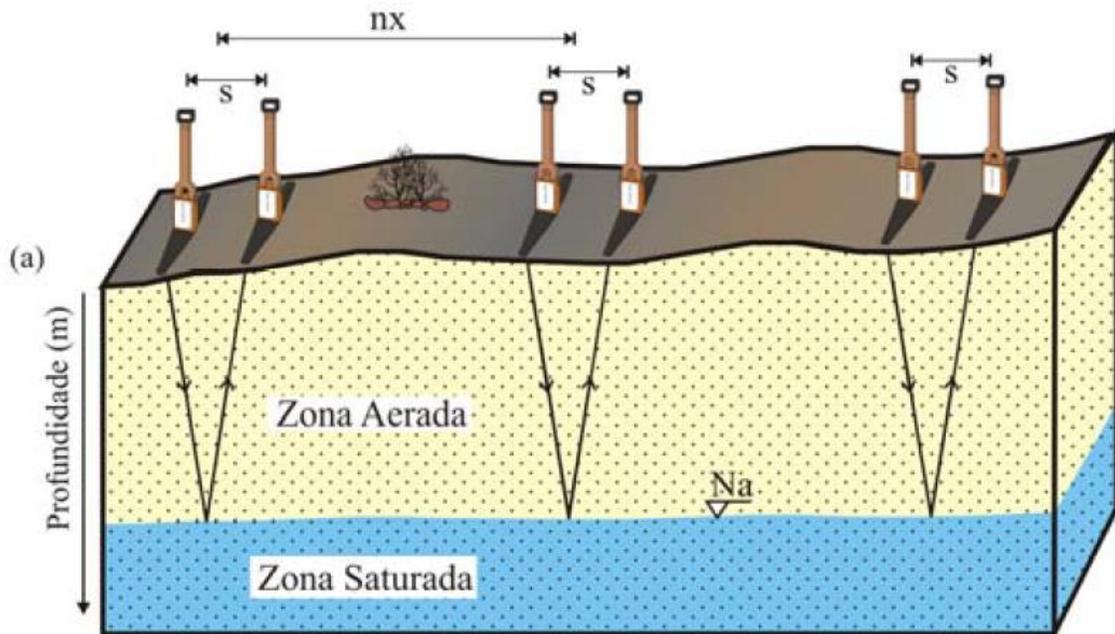
Na transiluminação, as antenas transmissora e receptora são colocadas em um poço. As imagens através da energia de propagação são produzidas paralelamente ao deslocamento das antenas.

A sondagem de velocidade é utilizada para estimar a velocidade de propagação da onda de radar em função do tempo duplo dos perfis de reflexão. Na técnica CMP, as antenas são deslocadas em sentidos opostos em relação a um ponto fixo central (**Figura 3-4a**). Na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é afastada (**Figura 3-4b**).



**Figura 3-4:** Esquema de sondagem de velocidade do tipo (a) CMP e do tipo (b)WARR. (BORGES, 2007)

No modo *Common offset* as antenas transmissora e receptora são movidas simultaneamente na superfície do solo, espaçadas a uma distância fixa, e deslocadas no mesmo sentido (**Figura 3-5**).



**Figura 3-5:** Esquema de aquisição de dados no modo *common offset*, onde  $S$  = espaçamento entre as antenas, e  $nx$  = espaçamento entre os traços (BORGES, 2007).

## 3.2 ELETORRESISTIVIDADE

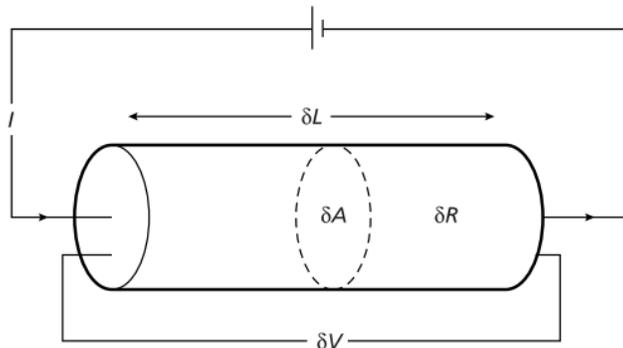
O método de geofísico de eletrorresistividade foi desenvolvido no início de 1900, mas só foi utilizado com maior frequência a partir da década de 70 (REYNOLDS, 1997). A eletrorresistividade utiliza as propriedades elétricas do meio para caracterizá-lo. Em maneira geral, são introduzidas correntes elétricas na superfície, as quais percorrem os materiais em subsuperfície, que geram diferenças de potencial que podem ser medidas em superfície. A relação entre a corrente introduzida e o potencial gerado, é proporcional a resistividade do meio (KEAREY; BROOKS; HILL, 1986).

### 3.2.1 Propriedades elétricas dos materiais

A resistividade elétrica é definida como a resistência em ohms ( $\Omega$ ) entre as faces opostas de um cilindro com lado de valor unitário de um determinado material. A unidade do Sistema Internacional de Unidades (SI) é “ohm vezes metro” ( $\Omega.m$ ). Em um material condutor ideal (**Figura 3-6**) a resistividade ( $\rho$ ) é expressa em termos da resistência elétrica ( $\delta R$ ), do comprimento do condutor ( $\delta L$ ) e da área da seção transversal ( $\delta A$ ), conforme a Equação 3.12.

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Diversos fatores influenciam nos valores de resistividade elétrica em subsuperfície, como a composição mineralógica, porosidade do material, interconectividade dos poros, conteúdo de água presente nos poros e quantidade de sais dissolvidos na água (**Figura 3-7**). Os fatores mais importantes são a quantidade de água e de sais dissolvidos, sendo que o aumento destes fatores leva a diminuição da resistividade do meio (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).



**Figura 3-6:** Parâmetros utilizados na definição da resistividade elétrica (KEAREY; BROOKS; HILL, 1986).

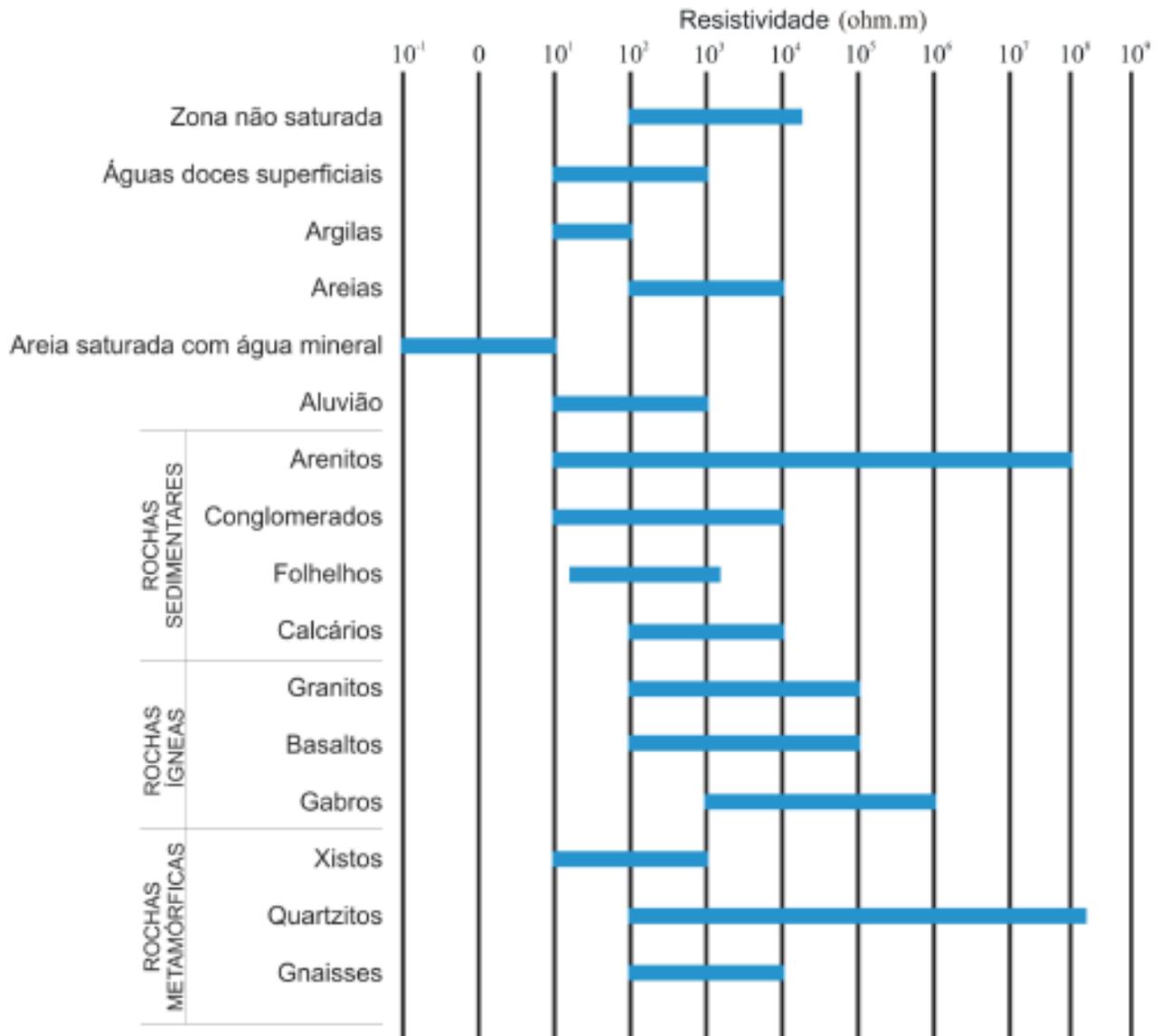
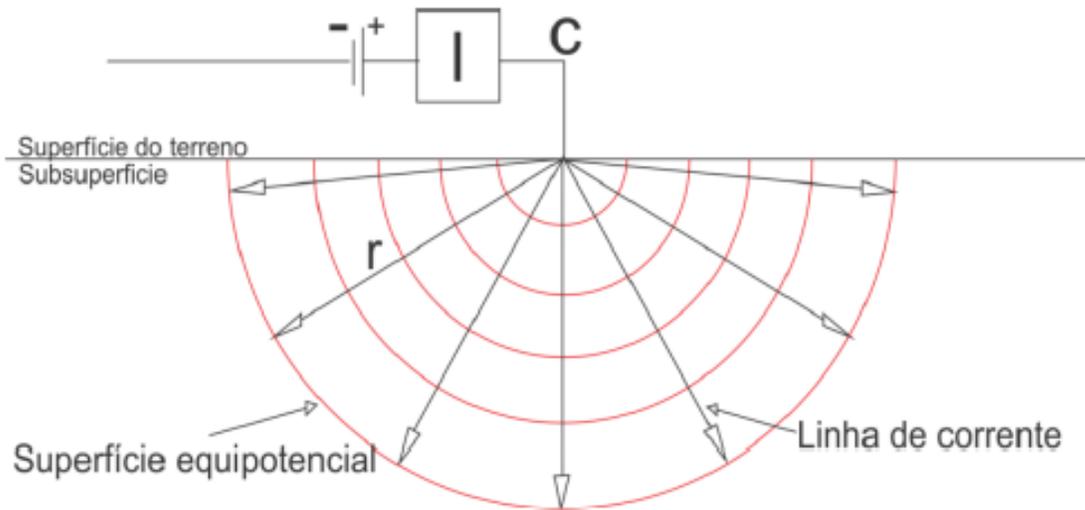


Figura 3-7: Intervalo de valores de resistividade elétrica de algumas rochas e materiais (LAGO, 2009)

### 3.2.2 Fluxo de corrente no solo

Para um meio homogêneo e isotrópico, e com resistividade ( $\rho$ ) constante, a propagação de corrente elétrica ocorre de forma radial e com uma geometria semiesférica (**Figura 3-8**). A uma distância ( $r$ ) do ponto de injeção, a corrente se distribui de maneira uniforme sobre a superfície da semiesfera. A área dessa semiesfera é dada por  $A=2\pi r^2$ . A densidade da corrente ( $\vec{j}$ ) pode ser descrita como a divisão de corrente ( $I$ ) pela área de distribuição da mesma.

$$\vec{J} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 3.13})$$



**Figura 3-8:** Representação gráfica idealizada da direção do fluxo de corrente em um semi-espaço homogêneo (CANATA, 2015).

A Lei de Ohm relaciona a corrente ( $I$ ), a diferença de potencial ( $\delta V$ ), e a resistência ( $R$ ) como segue:

$$\delta V = \delta RI \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Substituindo nesta equação o valor de  $R$  dado pela Equação 3.12 em que a distância  $L$ , seja representada pelo raio  $r$  da semiesfera, têm-se: ( $\vec{J}$ )

$$\delta V = -\rho \cdot \vec{J} \cdot \delta r = -\rho \frac{1}{2\pi r^2} \cdot \delta r \quad (\text{Eq. 3.15})$$

E a voltagem com relação à distância ( $V_r$ ) é resultante da integração da diferença de potencial em relação ao raio da semiesfera (Equação 3.16)

$$V_r = \int \delta V = - \int \rho \frac{1}{2\pi r^2} \cdot \delta r = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Quando é inserido um novo ponto de corrente, ocorrerá uma nova distribuição do potencial. Assim, o potencial  $V_P$  em algum ponto  $P$  no solo será igual a soma dos potenciais gerados nos dois pontos de

injeção de corrente, indicados por A(+I) e B(-I), com P localizado entre eles, de modo que  $V_P = V_A + V_B$ . Desta maneira, o potencial  $V_P$  em um dado ponto no solo dependerá também da distância deste ponto aos pontos de injeção de corrente.

Na configuração de quatro eletrodos, os eletrodos de corrente estão localizados nos pontos A e B, e os eletrodos para medida de potencial estão nos pontos M e N (**Figura 3.9**). Os potenciais nos eletrodos M e N podem ser calculados com as Equações 3.17 e 3.18

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] \quad (Eq. 3.17)$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \quad (Eq. 3.18)$$

Em que AM, MB, NA e NB correspondem as distâncias entre os eletrodos.

Todavia, é mais fácil medir a diferença de potencial,  $\delta V_{MN}$  conforme a Equação 3.19.

$$\delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\} \quad (Eq. 3.19)$$

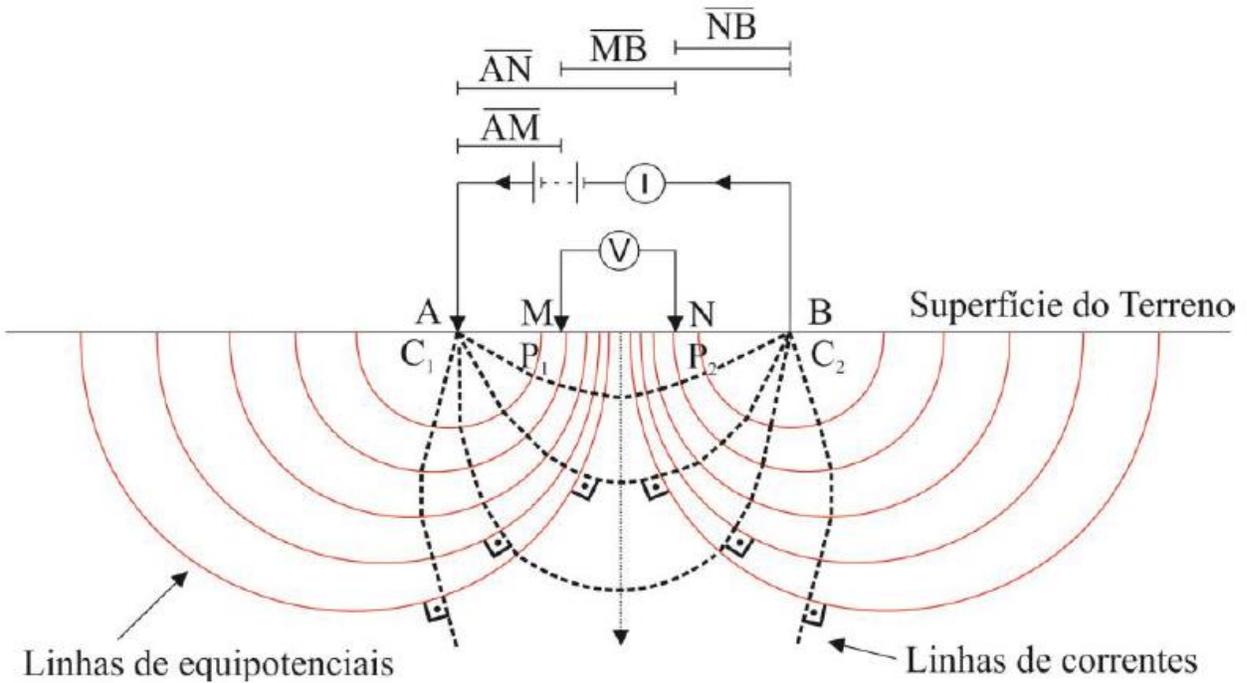
Reescrevendo a Equação 3.19 para que fique em função da resistividade elétrica (Equação 3.20), tem se:

$$\rho = \frac{2\pi \delta V_{MN}}{I} \left\{ \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}^{-1} \quad (Eq. 3.20)$$

A resistividade real de um subsolo homogêneo e isotrópico pode ser calculada por meio da Equação 3.20.

### 3.2.3 Resistividade aparente

A Equação 3.20 representa a resistividade real de um solo homogêneo e isotrópico. Porém, em um meio heterogêneo, o campo elétrico gerado pela corrente injetada irá sofrer variações referentes a esta heterogeneidade. Conforme a localização e/ou disposição do arranjo de eletrodos, o valor da resistividade será diferente (**Figura 3-9**). O resultado será um valor médio da resistividade, chamado de resistividade aparente ( $\rho_a$ ). Cada medida de resistividade em subsuperfície é a resistividade aparente de um intervalo homogêneo equivalente (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990)



**Figura 3-9:** Representação do fluxo de corrente e o potencial associado no subsolo para quatro eletrodos em superfície (LAGO, 2009).

A Equação 3.20 pode ser desmembrada em duas novas equações, uma evidenciando as características do meio em que a corrente viaja (Equação 3.21), e outra para o cálculo do fator geométrico (K) dos eletrodos (Equação 3.22):

$$\rho_a = \frac{\delta V_{MN}}{I} K \quad (Eq. 3.21)$$

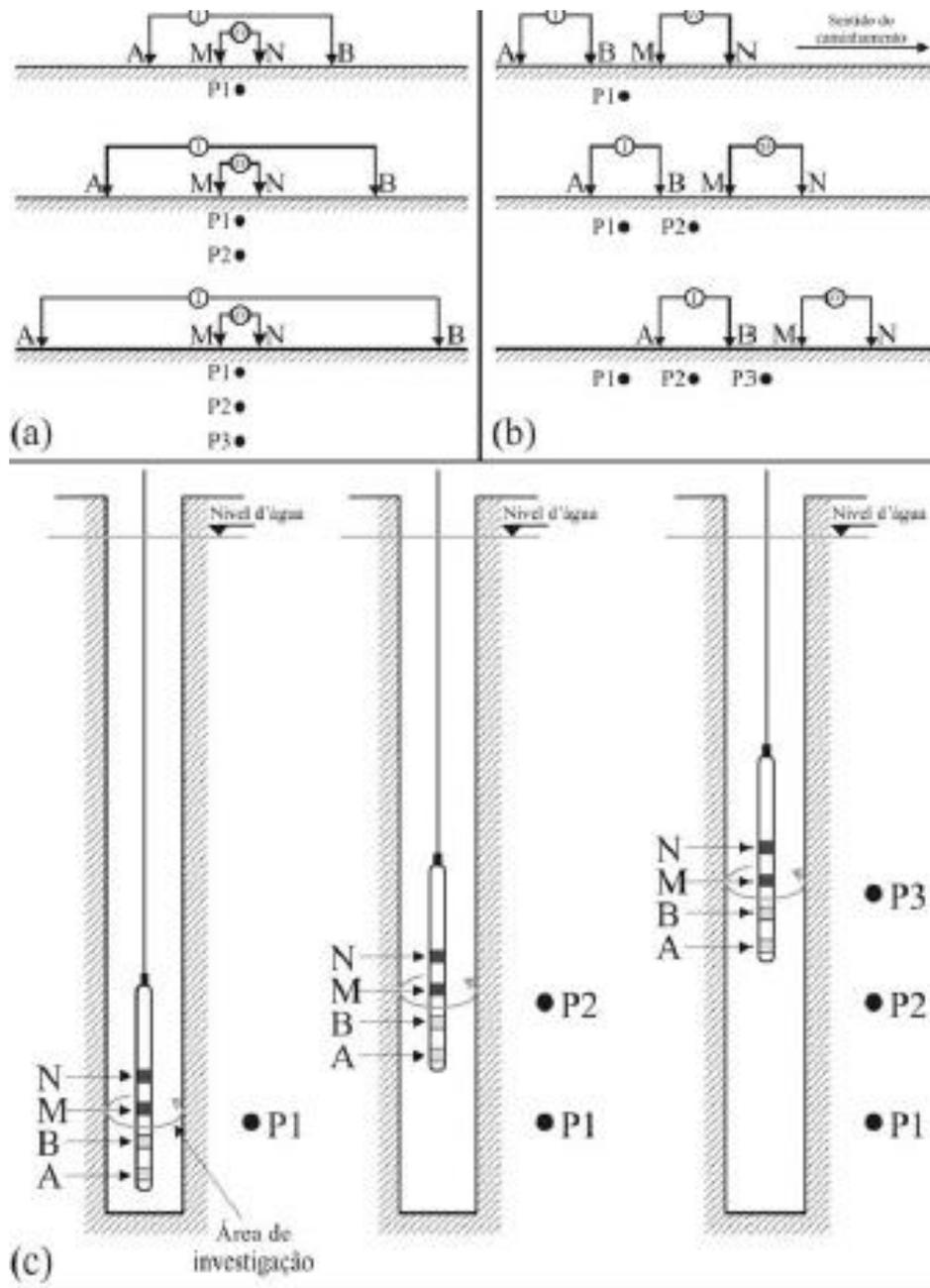
$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{MB}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) + \left(\frac{1}{NB}\right)} \quad (Eq. 3.22)$$

Para um levantamento de eletrorresistividade, o valor da resistividade aparente (Equação 3.21) depende da disposição espacial dos eletrodos (Equação 3.22). No entanto, outros fatores também irão influenciar, tais como, as características do meio.

### 3.2.4 Técnicas de aquisição

Na eletrorresistividade existem várias técnicas de aquisições de dados de campo e uma variedade de configurações de eletrodos, o que proporciona ao método um alto grau de versatilidade (**Figura 3-10**).

As técnicas mais comuns são: sondagem elétrica vertical (SEV), a perfilagem elétrica de poço (PEP) e o caminhamento elétrico (CE).



**Figura 3-10:** Técnicas de aquisição de dados de eletrorresistividade. a) Sondagem elétrica vertical - SEV. b) Caminhamento Elétrico - CE. c) Perfilagem Elétrica de Poço – PEP (BORGES, 2007).

A SEV é aplicada quando se deseja obter a variação vertical de resistividade do meio. Neste tipo de levantamento, os eletrodos são afastados progressivamente em relação ao ponto central fixo, de maneira que, quanto maior o espaçamento, maior será a profundidade de investigação.

Na perfilagem elétrica de poço, a resistividade é medida nas paredes dos poços, sendo muito utilizada na indústria do petróleo para caracterização do tipo de rocha, quantificação da porosidade em folhelhos e determinação de fácies com mesma assinatura de resistividade.

O CE é aplicado para determinar a variação lateral de resistividade. Este é similar a SEV, sendo que a única diferença é o deslocamento lateral de todo arranjo para gerar uma seção 2D.

### 3.2.5 Arranjos de eletrodos

Existem inúmeras configurações de eletrodos que podem ser utilizadas em levantamentos de eletrorresistividade. A escolha do arranjo de eletrodos depende da profundidade de investigação, da sensibilidade do arranjo às variações laterais e verticais, da cobertura horizontal dos dados, e da intensidade do sinal. (LOKE, 2001). Os dois arranjos mais conhecidos são o Schlumberger e o Wenner, os demais são derivados dos anteriores, desenvolvidos com o intuito de aprimorar os resultados, diminuindo, em alguns casos, o ruído nos dados e o tempo de aquisição em campo. Entre estes destacam-se os arranjos dipolo-dipolo, pólo-dipolo, pólo-pólo, Wenner-Schlumberger e gradiente.

Os arranjos Wenner e Schlumberger são sensíveis a variações verticais abaixo do centro da linha, porém menos sensíveis a variações horizontais de resistividade. Estes arranjos possuem uma profundidade de investigação moderada. O arranjo dipolo-dipolo é sensível a variações horizontais, mas não é o arranjo adequado para medir variações verticais, é um arranjo que possui profundidade de investigação menor do que os arranjos Wenner e Schlumberger. O arranjo polo-dipolo é assimétrico, e apresenta anomalias assimétricas de acordo com a direção do polo no arranjo. As anomalias assimétricas podem ser diminuídas fazendo leituras com os eletrodos na ordem inversa. É um arranjo muito sensível a estruturas verticais (LOKE, 2001).

O arranjo de eletrodos utilizado neste trabalho é o dipolo-dipolo. Neste arranjo, os eletrodos de potencial e de corrente são dispostos aos pares (dipolos) com espaçamento “a” igual entre os eletrodos. Cada par é separado por um múltiplo do espaçamento entre os eletrodos (na). Desta forma, o aumento da distância entre os dipolos relacionam-se com os níveis de investigação em profundidade, ou seja, quanto maior a distância, maior a profundidade de investigação.

Para se obter uma estimativa da profundidade máxima investigada em um levantamento, multiplica-se o espaçamento máximo “x” entre os eletrodos, ou o comprimento máximo do arranjo “L” pelo fator de profundidade ( $Z_e$ ) indicado na **Tabela 3-2**.

Tabela 3-2: Profundidade de investigação média ( $Z_e$ ) para o arranjo dipolo-dipolo (EDWARDS, 1977).

Arranjo	Níveis de investigação							
	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N= $\infty$
$Z_e/x$	0,416	0,697	0,962	1,220	1,476	1,730	1,983	1,220
$Z_e/L$	0,139	0,174	1,192	0,203	0,211	0,216	0,220	0,250

A Figura 3-11 ilustra alguns arranjos eletródicos comumente utilizados e seu fator geométrico.

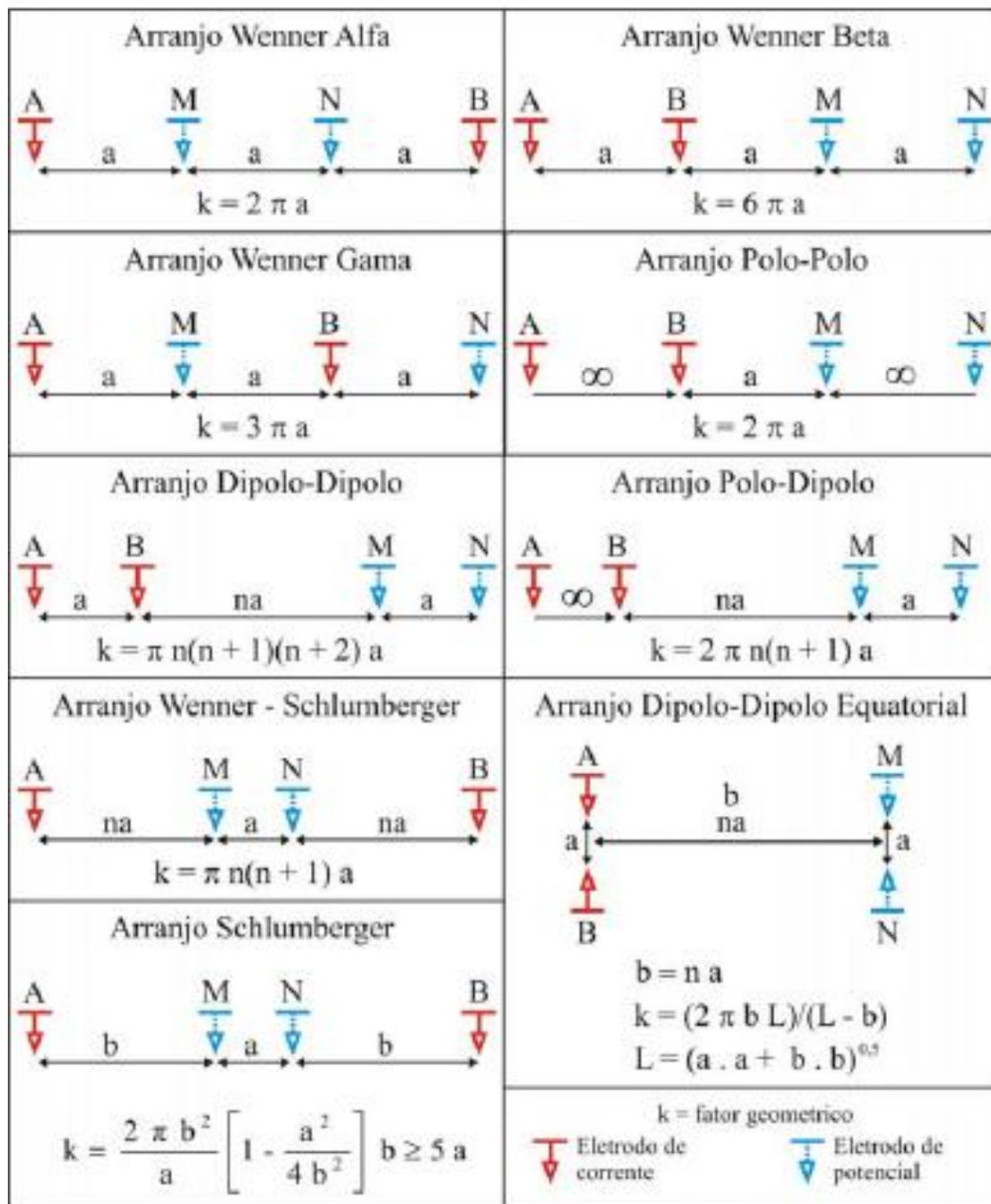


Figura 3-11: Principais arranjos eletródicos e seus fatores geométricos (BORGES, 2007).

## CAPÍTULO 4

### 4 ARTIGO 1

#### **“ESTIMATIVA DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE SOLOS E ROCHAS COM RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO, NA ÁREA DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE PIRENÓPOLIS, GO”**

##### **Resumo**

A determinação de áreas para a disposição de resíduos sólidos urbanos prevê a existência de um subsolo com baixa permeabilidade hidráulica para a contenção de fluídos provenientes do lixo, principalmente o chorume. Os ensaios diretos para a determinação da condutividade hidráulica do solo amostram pontualmente e podem não representar efetivamente o comportamento do meio. O uso de métodos geofísicos na determinação de características físicas do meio auxilia na elaboração de melhores modelos espaciais das camadas do subsolo. Este trabalho descreve os procedimentos de campo e apresenta os resultados de radar de penetração no solo (ground penetrating radar – GPR) realizados na área de descarte de resíduos sólidos do município de Pirenópolis, Goiás. As investigações geofísicas objetivam a determinação de áreas impróprias para a disposição de resíduos sólidos, estimativa da espessura e composição do solo, localização de áreas com possível percolação de chorume, e determinação da profundidade do topo rochoso. O registro dos dados de GPR ocorreu com o sistema SIR3000, acoplado a uma antena blindada de 200 MHz, no interior e nos arredores do aterro. Com as seções de GPR identificaram-se padrões de reflexão típicos de solos, rochas, resíduos sólidos urbanos e materiais percolados por chorume. As investigações com o GPR mostram solos arenosos na região com espessuras entre 0,2 a 9 metros, o topo das rochas, foliações, e estruturas deformacionais (dobras e falhas). Os

resultados confirmam que, apesar do local ser impróprio para a disposição de resíduos, o chorume não ultrapassa os limites do Lixão de Pirenópolis dentro da profundidade de investigação do GPR.

**Palavras-chave:** GPR, Lixão de Pirenópolis.

### **Abstract**

The selection of areas for the disposal of solid urban waste suggests the existence of subsoil with low hydraulic permeability for the containment of fluids from waste, mainly leachate. The direct tests to calculate soil hydraulic conductivity show punctual information that may not represent the exact behavior of the medium. The use of geophysical methods to obtain soil physical characteristics of the medium can assist in achieving better spatial models for the subsurface. This study describes the field work and results of ground penetrating radar (GPR) acquisition, carried out in the solid waste disposal site of the city of Pirenópolis, Goiás. Geophysical investigations help to find areas that are not suitable for solid waste disposal, as well as estimation of the thickness and composition of the soil, location of areas with possible leachate percolation, and the depth of the bedrock. The GPR data was acquired with the SIR3000 system, coupled to a 200 MHz shielded antenna. The GPR sections identified patterns of reflection typical of soils, rocks, solid urban waste and leachate percolated materials. The investigations with the GPR show sandy soils in the region with thicknesses between 0.2 and 9 meters, the top of the rocks, foliations, and deformation structures (folds and faults). The results confirm that, although the site is not suitable for waste disposal, the leachate does not exceed the limits of the Pirenópolis waste area within the research depth of the GPR.

**Key words:** *GPR, Pirenópolis Landfill*

## 4.1 INTRODUÇÃO

A seleção de uma área designada ao aterro sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares deve atender, no mínimo, aos critérios técnicos impostos pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelas legislações federal, estadual e municipal, quando houver.

A NBR-13.896 (ABNT, 1997) aponta parâmetros técnicos adequados para a implantação de aterros. Na norma recomenda-se a instalação de áreas de disposição de resíduos urbanos em locais com declividade superior a 1 % e inferior a 30 %; locais com uma distância mínima de 200 m de corpos d'água, tais como rios, lagos e lagoas. Além disso, é desejável que o solo do terreno selecionado tenha uma certa impermeabilidade natural, a fim de reduzir as possibilidades de contaminação de aquíferos. As áreas selecionadas devem ter uma zona não saturada com espessura superior a 3 metros e características argilosas, com o coeficiente de permeabilidade (k) inferior a  $10^{-6}$  cm/s.

A determinação do coeficiente de permeabilidade (k) ocorre através de ensaios de laboratório (amostras indeformadas) e de ensaios “in situ”. Os solos arenosos possuem coeficiente de permeabilidade acima de  $10^{-5}$  cm/s, já os solos argilosos mostram valores inferiores (**Tabela 4-1**).

**Tabela 4-1:** Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos (NBR 16416; ABNT, 2015).

Permeabilidade		Tipo de Solo	Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	$> 10^{-3}$
	Alta	Areias	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
	Baixa	Siltes e Argilas	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Solos impermeáveis	Muito Baixa	Argila	$10^{-7}$ a $10^{-9}$
	Baixíssima	Argila	$< 10^{-9}$

A utilização de metodologias não invasivas para a estimativa de parâmetros físicos e hidráulicos do subsolo possibilitam a investigação de amplas áreas em menor tempo, o que favorece a elaboração de modelos detalhados do meio. O radar de penetração no solo (Ground Penetrating Radar – GPR) é um

método geofísico que possui um elevado potencial para determinar as características geométricas e físicas de solos (CHARLTON; WHITE, 2006; HUISMAN et al., 2002; WIJEWARDANA; GALAGEDARA, 2010).

O método GPR utiliza a propagação e o registro de ondas eletromagnéticas de alta frequência (10 a 3000 MHz) para identificar mudanças de propriedades elétricas no meio (ANNAN, 1996). A sua enorme versatilidade operacional possibilita a aquisição de grande quantidade de dados em pequeno intervalo de tempo, o que viabiliza uma amostragem espacial detalhada e de alta resolução.

No GPR, tanto a condutividade elétrica, quanto a permissividade dielétrica são fatores relevantes, porque afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar. A condição mais favorável do funcionamento do método GPR ocorre em locais com materiais geológicos de baixa perda (*lossy dielectric medium*)- regiões de baixa atenuação do sinal eletromagnético (ANNAN, 1996; BERES e HAENI, 1991; DAVIS e ANNAN, 1988, 1989; BORGES e PORSANI, 2003; DOURADO et al., 2003; BUSBY et al., 2004). Os inúmeros trabalhos de GPR realizados em locais de ocorrência de solos e rochas arenosas mostram excelentes resultados, principalmente em função da baixa atenuação sofrida pelo sinal eletromagnético nestes meios (KRUSE et al., 2000; DOURADO et al., 2001; ORTEGA, 2006; LAUREANO e SHIRAIWA, 2008).

A profundidade de penetração em solos e rochas sem água é da ordem de algumas dezenas de metros, e ela é consideravelmente menor quando o meio estiver úmido ou com presença de argila, uma vez que tanto a água quanto o conteúdo de argila aumentam a condutividade elétrica do meio, e conseqüentemente atenuam o sinal do GPR (WENSINK, 1993). A atenuação do sinal do GPR é perceptível no espectro de amplitude, uma vez que o pico máximo da frequência fica bem abaixo da frequência central da antena; e na amplitude instantânea (Transformada de Hilbert) os valores de envoltória que tendem a zero representam as áreas de maior perda de sinal (CHARLTON; WHITE,

2006). Os maiores conteúdos de água e argila no meio provocam um aumento na constante dielétrica e consequentemente menores velocidades de propagação da onda eletromagnética. Nas seções de GPR esta redução de velocidade é claramente observada nas menores aberturas das hipérbolas de difração presentes na parte superficial das seções de afastamento constante, que são relacionadas a presença de raízes, buracos e fragmentos de rochas dentro dos sedimentos.

Os trabalhos de GPR para a determinação de conteúdos de argila e de água no subsolo sempre estabelecem calibrações com métodos convencionais de amostragem (reflectometria no domínio do tempo – TDR, umidade volumétrica e sonda de nêutrons). A aplicação de GPR em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos para a localização de plumas de contaminação confirmam uma elevada atenuação do sinal eletromagnético nas áreas de percolação de chorume e pouca atenuação de sinal sobre os resíduos sem chorume (CAVALCANTI et al., 2014; LAUREANO; SHIRAIWA, 2008).

No contexto de determinar a espessura do solo, a topografia do topo rochoso, estimar a permeabilidade natural e textura do subsolo, localizar eventuais locais de percolação de chorume no subsol e caracterizar estruturas geológicas, mostram-se neste trabalho os resultados obtidos com o uso do método geofísico Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar – GPR*) na área do Lixão Municipal de Pirenópolis, estado de Goiás.

#### **4.1.1 Características geológicas da área**

A área do Lixão Municipal de Pirenópolis localiza-se a 6 km a sudoeste da área urbana de Pirenópolis, no lado direito da rodovia GO-431, sentido Pirenópolis a Interlândia (Figura 4-1).

As rochas desta região pertencem à unidade geotectônica Faixa Brasília (representada como um cinturão móvel, depositado e deformado na margem oeste do Cráton São Francisco, sobre um embasamento constituído por terrenos granito gnáissicos paleoproterozóicos, afetado por um sistema de

dobramentos neoproterozóicos. Esta faixa está dividida em Zona Interna e Zona Externa. Entre as rochas que constituem a denominada Zona Interna estão as rochas do Grupo Araxá (MCT, 2006). Além deste, ocorrem também na região da área de estudo a unidade geológica Sequência Metavulcanossedimentar Rio do Peixe.

A área do Lixão Municipal de Pirenópolis encontra-se sobre a Unidade B do Grupo Araxá (**Figura 4-1**). O Grupo Araxá, representado na área por sua Unidade B, é composto de quartzitos e granada-muscovita-biotita xistos, granada-clorita-muscovita xistos localmente piritosos, calci-clorita-biotita xistos por vezes feldspáticos, calci-granada-clorita xistos e intercalações de hornblenda-granada xisto feldspático, grafita xisto e lentes de metacalcário e quartzitos micáceos (MCT, 2006; MME/CPRM; SIC/FUNMINERAL/GO, 2008). Esta unidade ocorre nos municípios de Pirenópolis, Cocalzinho e Corumbá de Goiás e é a fonte de rocha quartzítica lavrada na região (“Pedra de Pirenópolis”).

A Sequência Metavulcanossedimentar Rio do Peixe ocorre em duas pequenas faixas na porção W-SW no município de Pirenópolis. Esse conjunto metavulcanossedimentar, metamorfoisado na fácies xisto verde a anfíbolito, é representado, por duas unidades. A Unidade 2, metassedimentar, é composta por quartzos xistos, quartzitos, xistos feldspáticos, micaxistos e anfíbolitos subordinados (NASCIMENTO, 1985 apud MME/CPRM; SIC/FUNMINERAL/GO, 2008)

O Lixão municipal de Pirenópolis está inserido na classe Latossolo Vermelho. Este solo possui textura média a arenosa. O alto teor de areia e/ou estrutura granular e grumosa contribui para uma maior porosidade efetiva e conseqüente maior condutividade hidráulica (ALMEIDA et al., 2006).

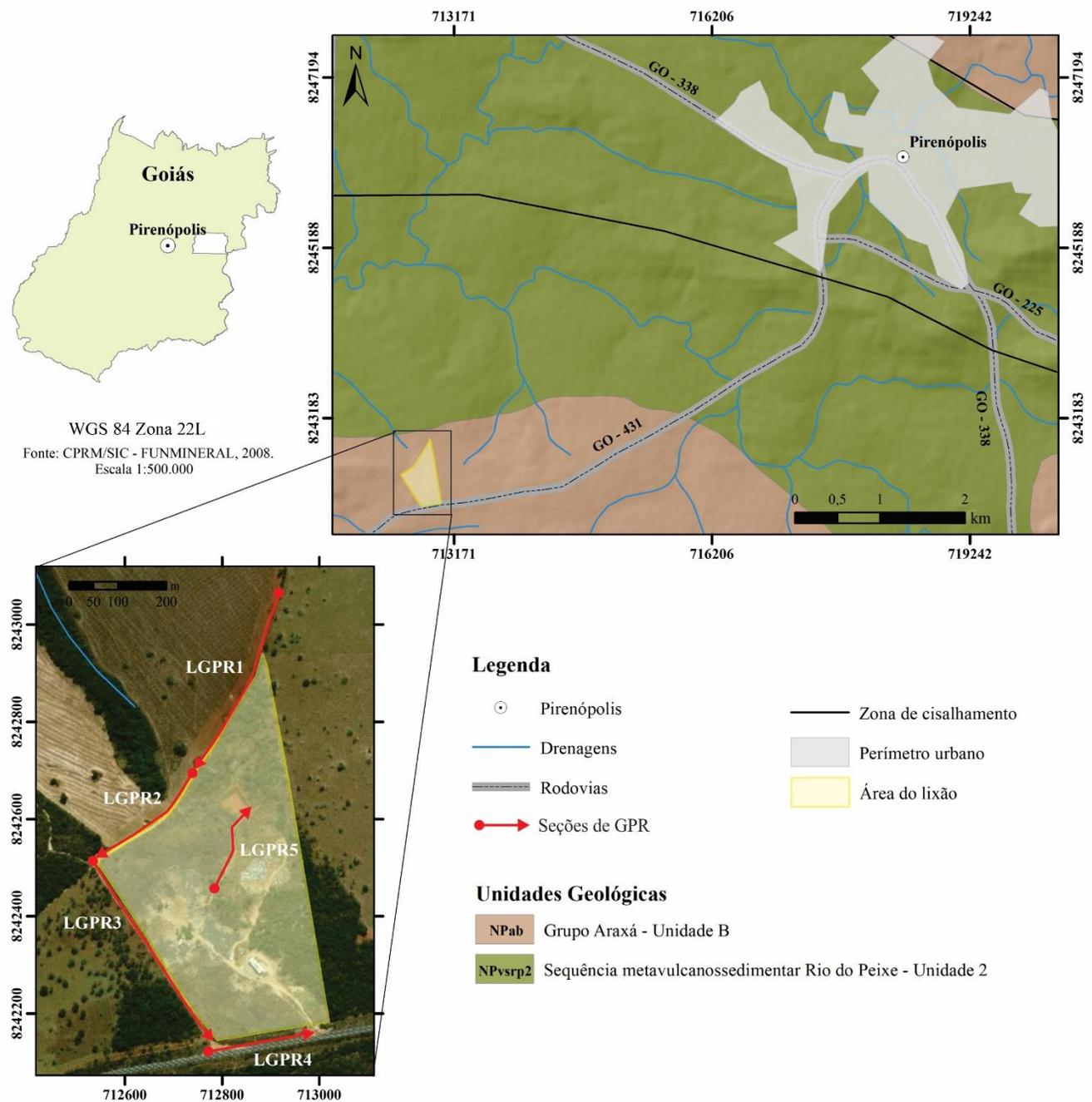


Figura 4-1: Mapa geológico da área com a localização das seções de GPR no Lixão Municipal de Pirenópolis-GO.

## 4.2 METODOLOGIA

As investigações com o GPR aconteceram no interior e nas vizinhanças do Lixão de Pirenópolis (Figura 4-1) com o objetivo de verificar os padrões eletromagnéticos de reflexão.

As aquisições de dados eletromagnéticos com o GPR ocorreram no modo *common offset*, com os seguintes parâmetros: espaçamento entre os traços de 0,05 m, frequência de amostragem de 2300MHz com janela temporal de 220ns e 1024 amostras por traço, correspondendo a um intervalo de amostragem temporal de 0,21 ns. O equipamento utilizado foi SIR3000, fabricado pela empresa GSSI, com antenas blindadas com frequências centrais de 200 MHz (Figura 4-2).

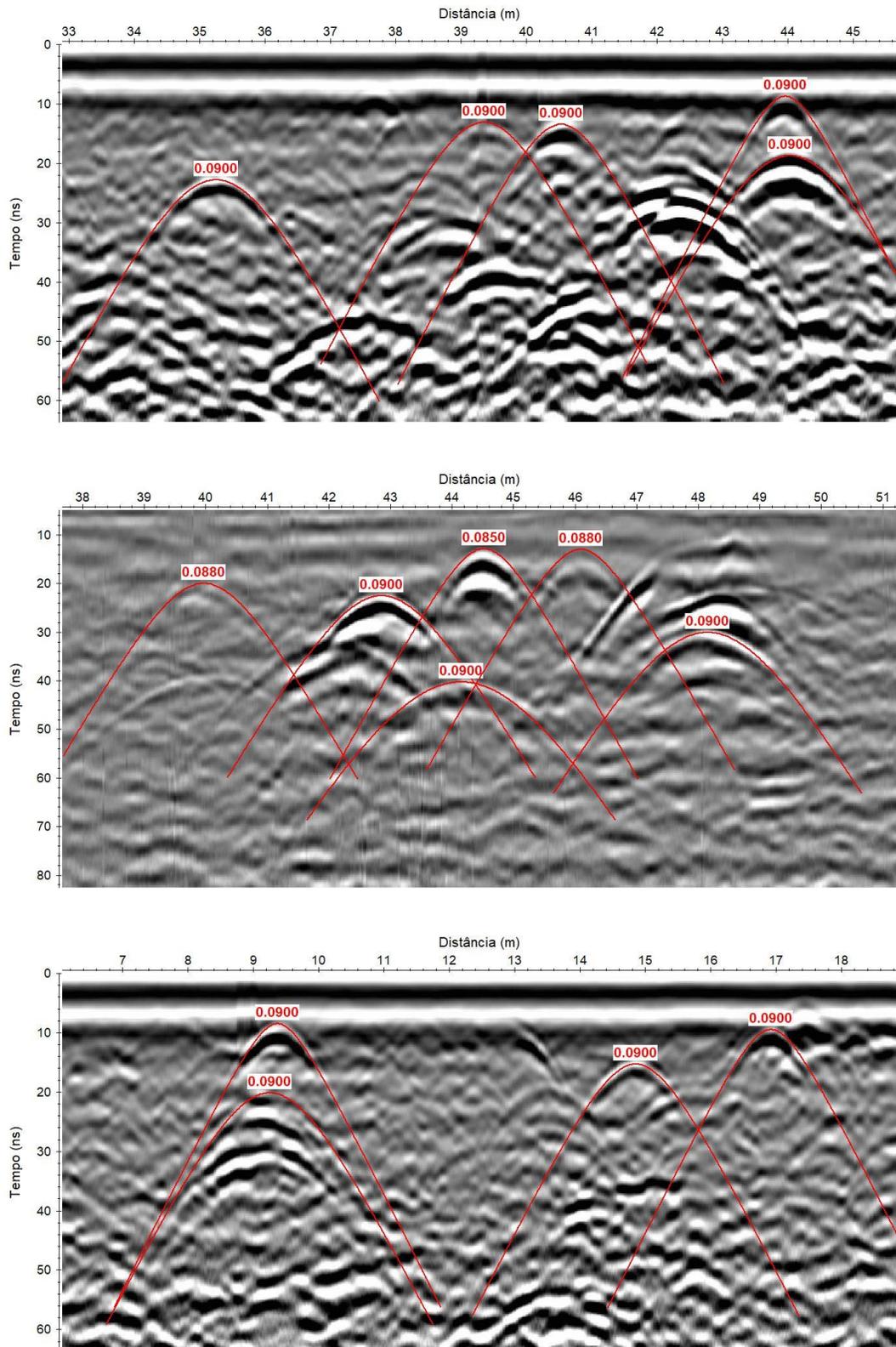


**Figura 4-2:** Fotos evidenciam a aquisição de dados de GPR com o equipamento SIR-3000 acoplado a uma antena blindada de 200 MHz, no interior e nos arredores do Lixão de Pirenópolis/GO.

O processamento dos dados de GPR ocorreu no software ReflexW, versão 7.5 (Sandmeier, 2018). As etapas realizadas no processamento foram o ajuste do tempo zero, a remoção do ganho de campo, aplicação de um ganho de decaimento de energia, migração, conversão de tempo para profundidade e inserção de topografia. O ajuste do tempo zero (*set time zero*) objetiva posicionar o evento da onda primeira chegada da onda eletromagnética em sua posição correta. A remoção do ganho de campo (*remove header gain*) retira a curva de ganho aplicada durante a aquisição de dados para melhor visualização dos eventos nos radargramas. O ganho de decaimento de energia recupera a amplitude do sinal eletromagnético atenuado durante a propagação do sinal no meio.

Para obter a velocidade da onda eletromagnética do GPR na área optou-se pelo método de análise de velocidade de difrações hiperbólicas. Após a aplicação de filtros e ganhos, realizaram-se as buscas por hipérboles ao longo dos radargramas (Figura 4.3). O ajuste de velocidades nas hipérboles possibilitou a identificação de uma velocidade para a onda eletromagnética de  $0,087 \pm 0,0015$  m/ns.

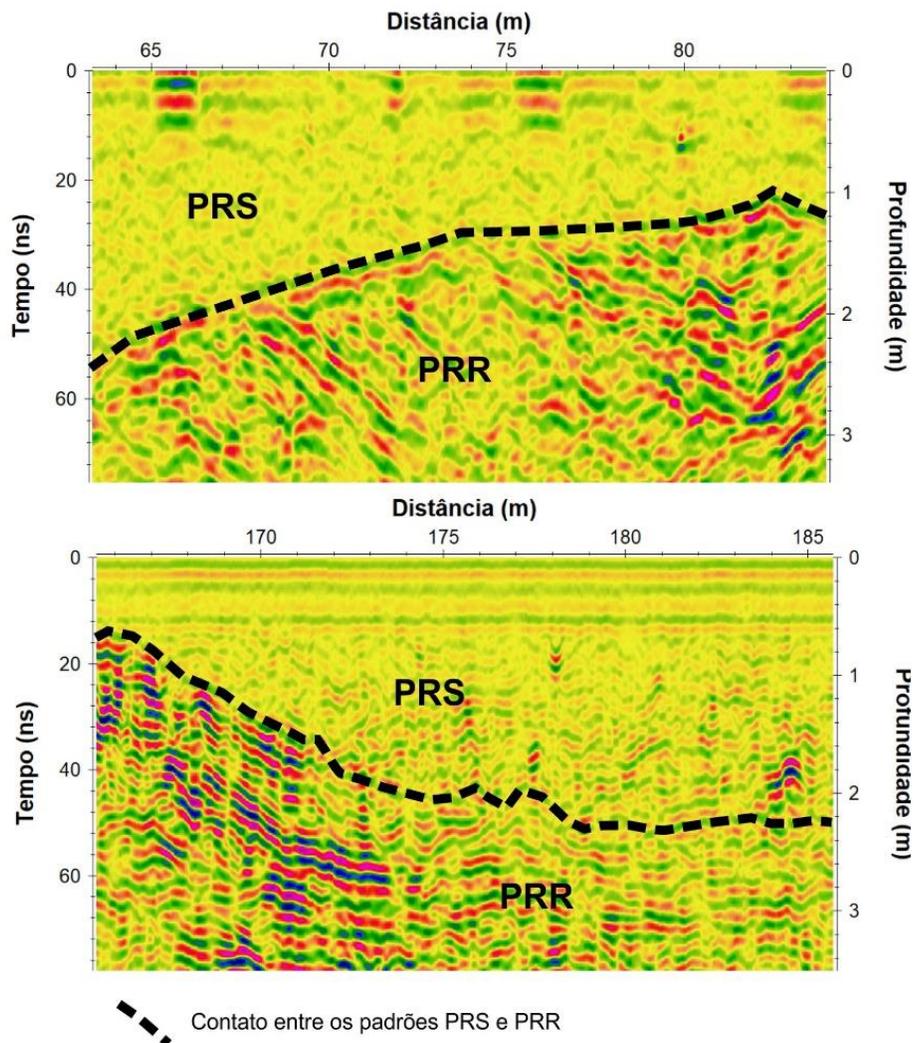
Com a velocidade do meio realizaram-se a migração dos pontos de difração, a conversão das seções de tempo para profundidade e o ajuste topográfico. Para comparação de amplitude das seções de GPR, a mesma rotina de processamento foi aplicada ao conjunto de dados.



**Figura 4-3:** Hipérbolas de difração e respectivas velocidades das ondas eletromagnéticas identificadas em partes de radargramas obtidos na área do Lixão de Pirenópolis/GO.

### 4.3 RESULTADOS

A seções de GPR realizadas no interior e nos arredores do Lixão de Pirenópolis/GO identificaram 2 padrões distintos de reflexão (PRS e PRR; **Figura 4-4**).



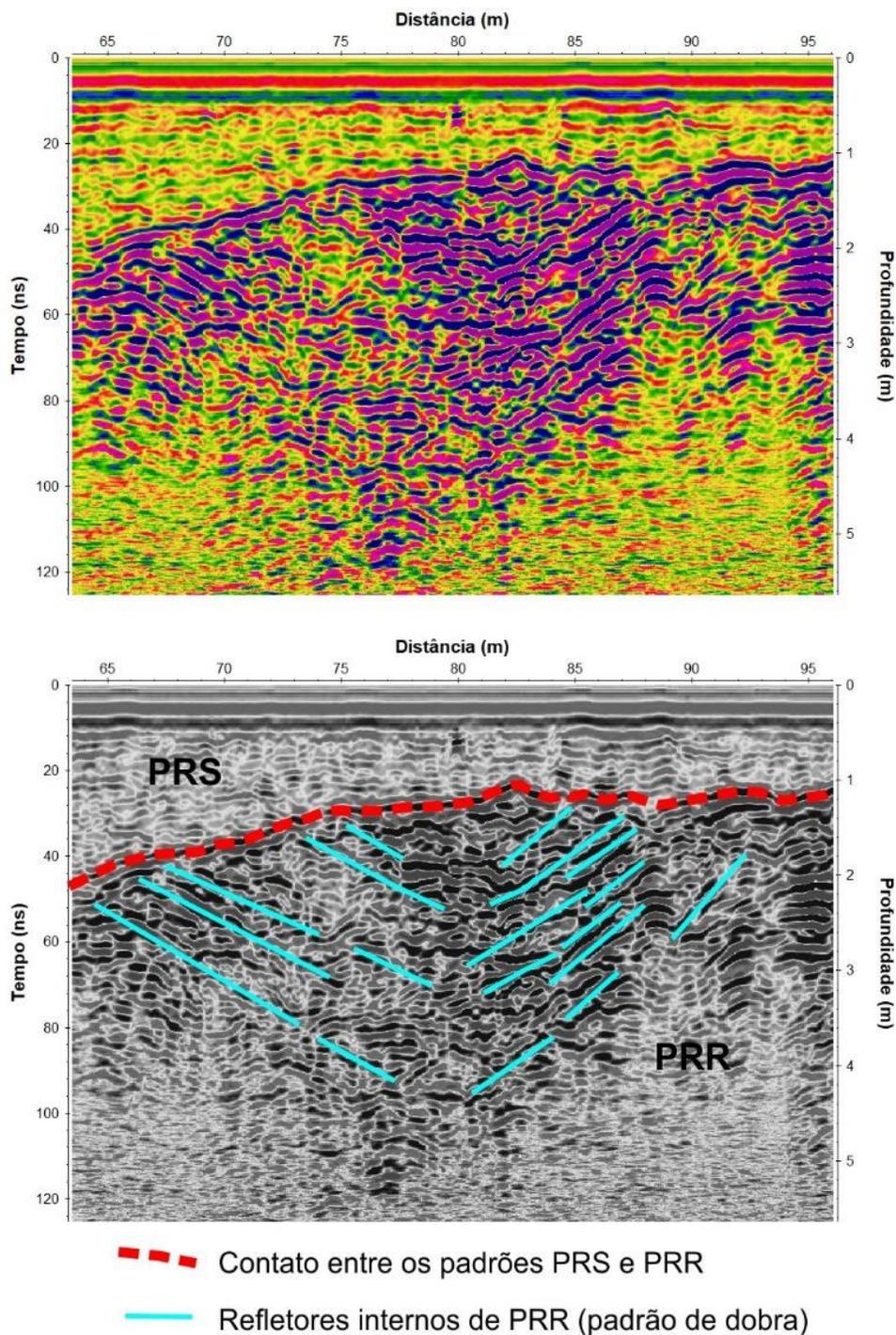
**Figura 4-4:** Partes de seções de GPR com os padrões de reflexão (PRS e PRR) característicos da área do Lixão de Pirenópolis/GO.

O padrão de reflexão PRS caracteriza-se pela presença de refletos descontínuos e caóticos com média amplitude. Neste padrão ocorrem, distribuídas de maneira aleatória, algumas hipérbolas de difração de alta amplitude, que após a aplicação da etapa de migração, colapsam para refletos pontuais. O PRS relaciona-se com os solos existentes na área (latossolos vermelho arenosos e argilosos), e as

hipérboles de difração representam pequenos fragmentos de rochas, vazios no solo (buracos de tatus) e eventualmente raízes de árvores.

O PRR mostra refletores de alta a média amplitude, contínuos e lineares. Este padrão ocorre sempre abaixo de PRS, em profundidades de 0,1 a 5 metros. O contato de PRS com PRR ocorre como um refletor de alta amplitude e com a morfologia discordante com os refletores de PRR. Deste modo, o PRR relaciona-se ao padrão de reflexão das rochas presentes na região (quartzitos ou granada muscovita biotita xistos), uma vez que alguns refletores mostram estruturas correlacionáveis à dobras (**Figura 4-5**).

Além dos padrões PRS e PRR notam-se na seção de GPR L5, realizada dentro da área do Lixão de Pirenópolis, dois padrões de reflexão característicos de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos, o PRL e o PRC. O PRL ocorre em uma área restrita, entre as profundidades de 0,2 a 2,3 metros, caracterizando-se por refletores caóticos de alta amplitude (**Figura 4-6**). O PRC acontece abaixo de PRL, diferenciando-se dos demais pela ausência de refletores. Deste modo relaciona-se PRL aos resíduos sólidos urbanos secos, e o PRC ao material proveniente da decomposição de parte dos resíduos orgânicos presentes no lixo urbano (material condutivo proveniente da percolação de chorume). A presença do PRL em parte da seção LGPR5 limita a propagação da onda eletromagnética para maiores profundidades, o que impossibilita a identificação do topo rochoso.



**Figura 4-5:** Parte da seção LGPR2 com os padrões de reflexão (PRS e PRR) e destaque para refletores internos de PRR que indicam um dobramento nas rochas da área do Lixão de Pirenópolis/GO.

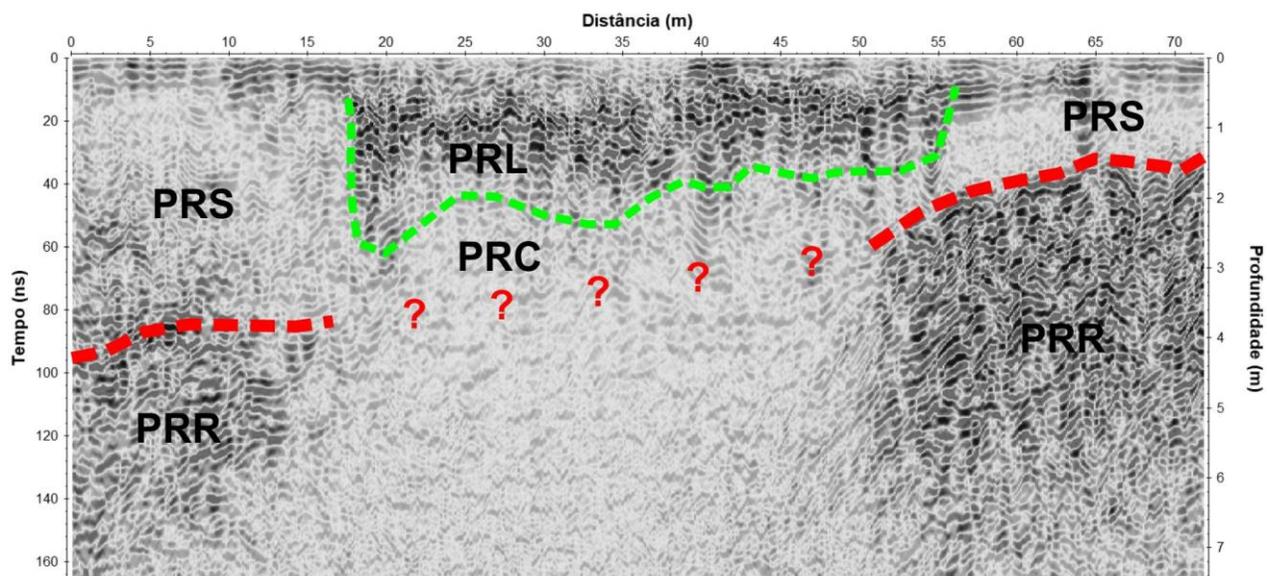
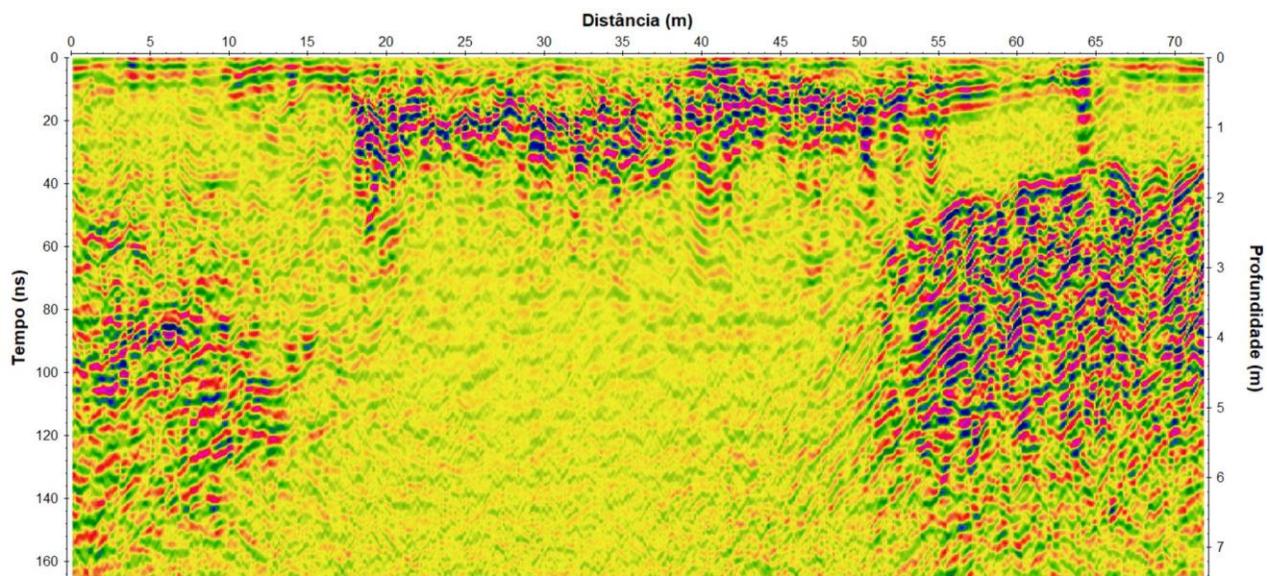
Nas seções de LGPR1, LGPR2, LGPR3 e LGPR4 registram-se refletores até a profundidade máxima investigada de 9 metros, o que possibilitou a identificação de limites entre os solos e o topo

rochoso. Na seção de LGPR1 nota-se que o solo é menos espesso na parte leste do Lixão e mais profundo no final da seção, com profundidades superiores às investigadas com o GPR (**Figura 4-7**).

Na seção de LGPR2, que é contínua à seção LGPR1, nota-se que o solo possui grande espessura na parte inicial e diminui para 0,5 metro no final da seção. Nesta seção observam-se refletores horizontalizados contínuos, as vezes inclinados, com início em 64 m, e profundidade entre 0,5 e 1,8m. Estes refletores evidenciam o contraste solo/topo rochoso. Entre 69m e 95 m observa-se um forte refletor inclinado característico de uma dobra (**Figura 4-8**).

Na seção LGPR3 (**Figura 4-9**) nota-se a presença de refletores inclinados no interior da rocha (estrutura sinforme) entre as posições de 160 a 220 metros. O solo na seção possui uma espessura inferior a 0,5 metros, com exceção da ocorrência de um solo de 2 metros no interior da sinforme.

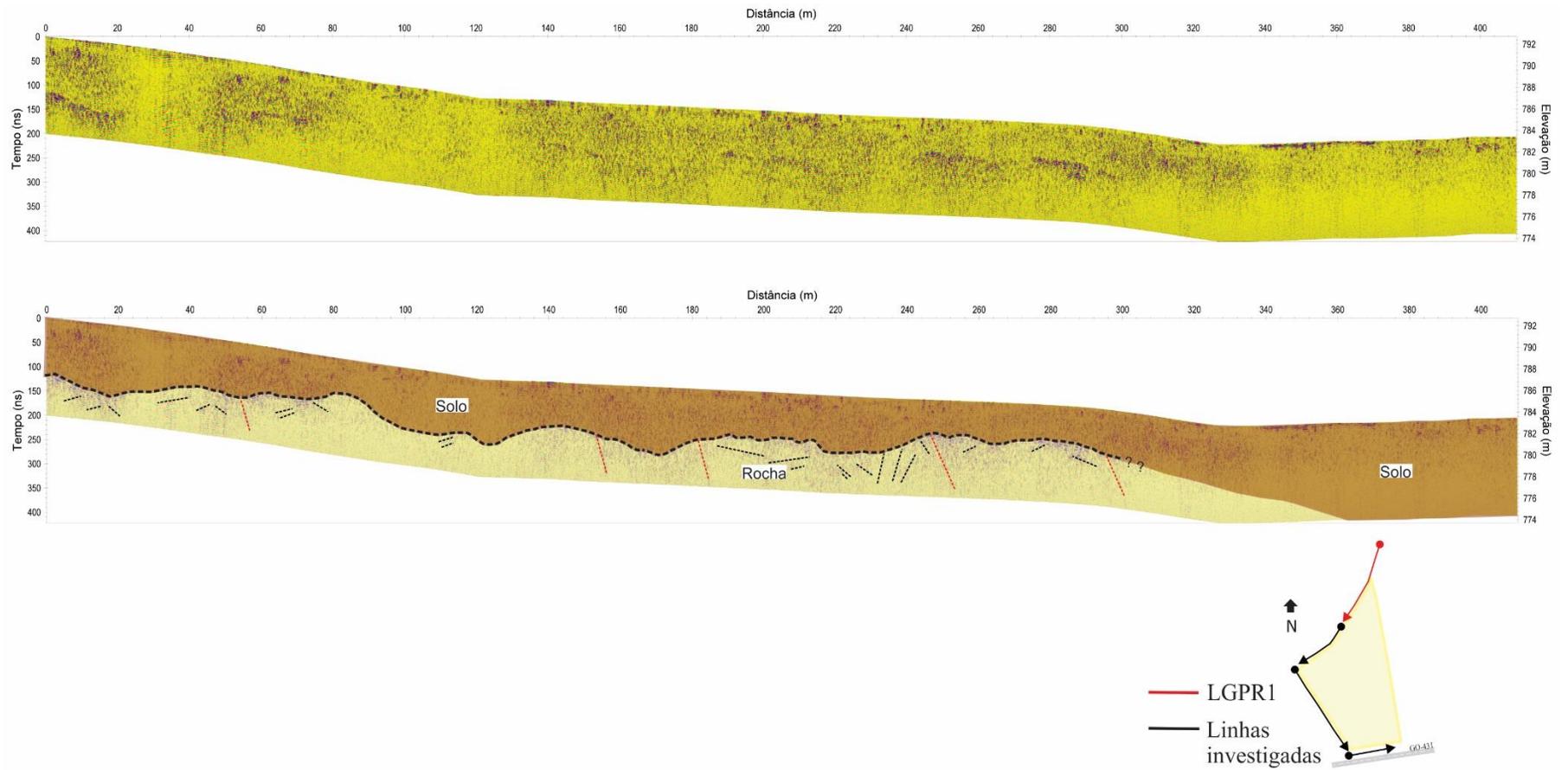
A seção de LGPR4, realizada na frente do Lixão de Pirenópolis, evidencia um solo com espessura máxima de 2 metros, e foliações de baixo ângulo nas rochas (**Figura 4-10**).



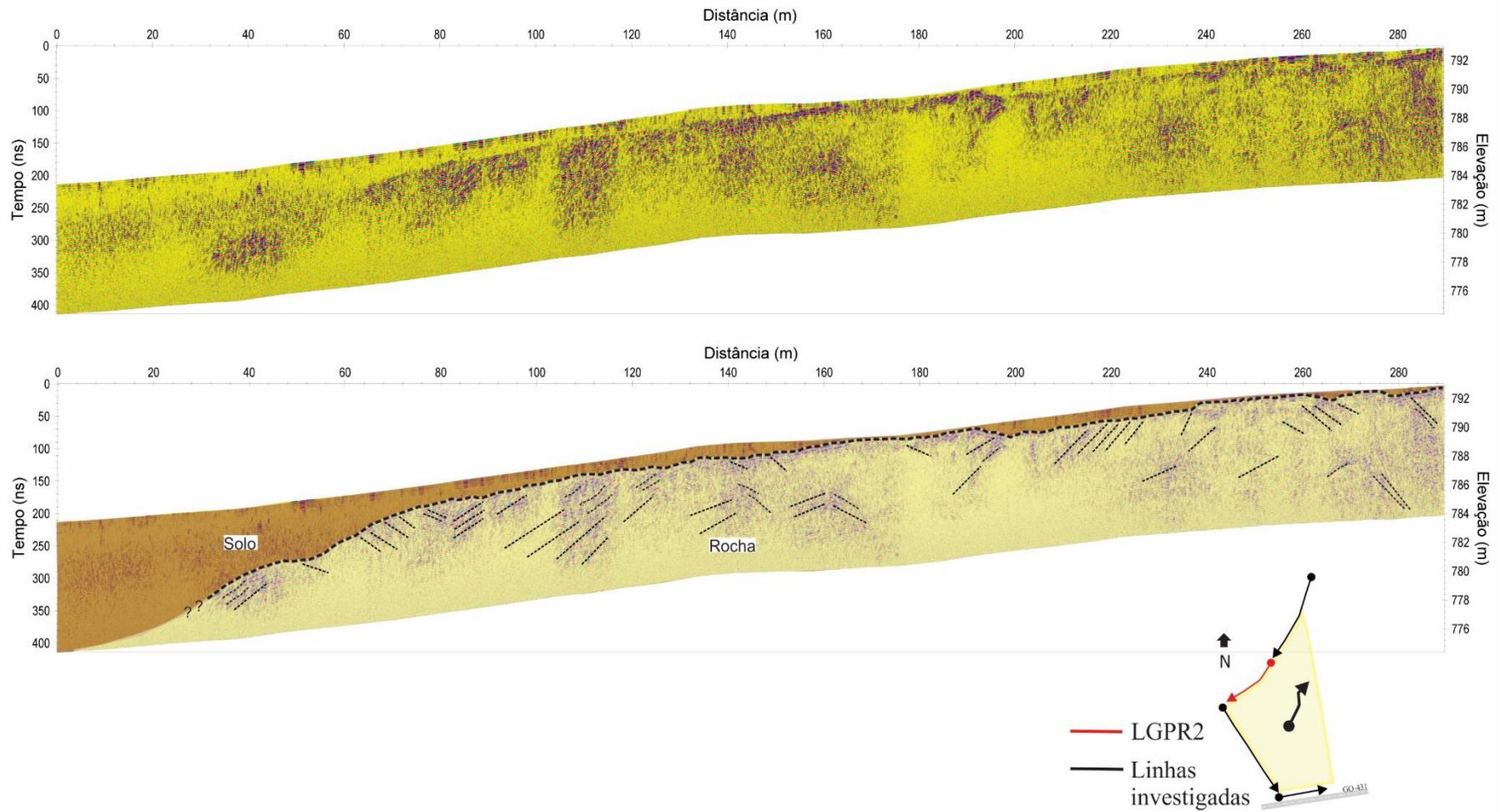
--- Contato entre os padrões PRS e PRR

--- Contato entre os padrões PRL e PRC

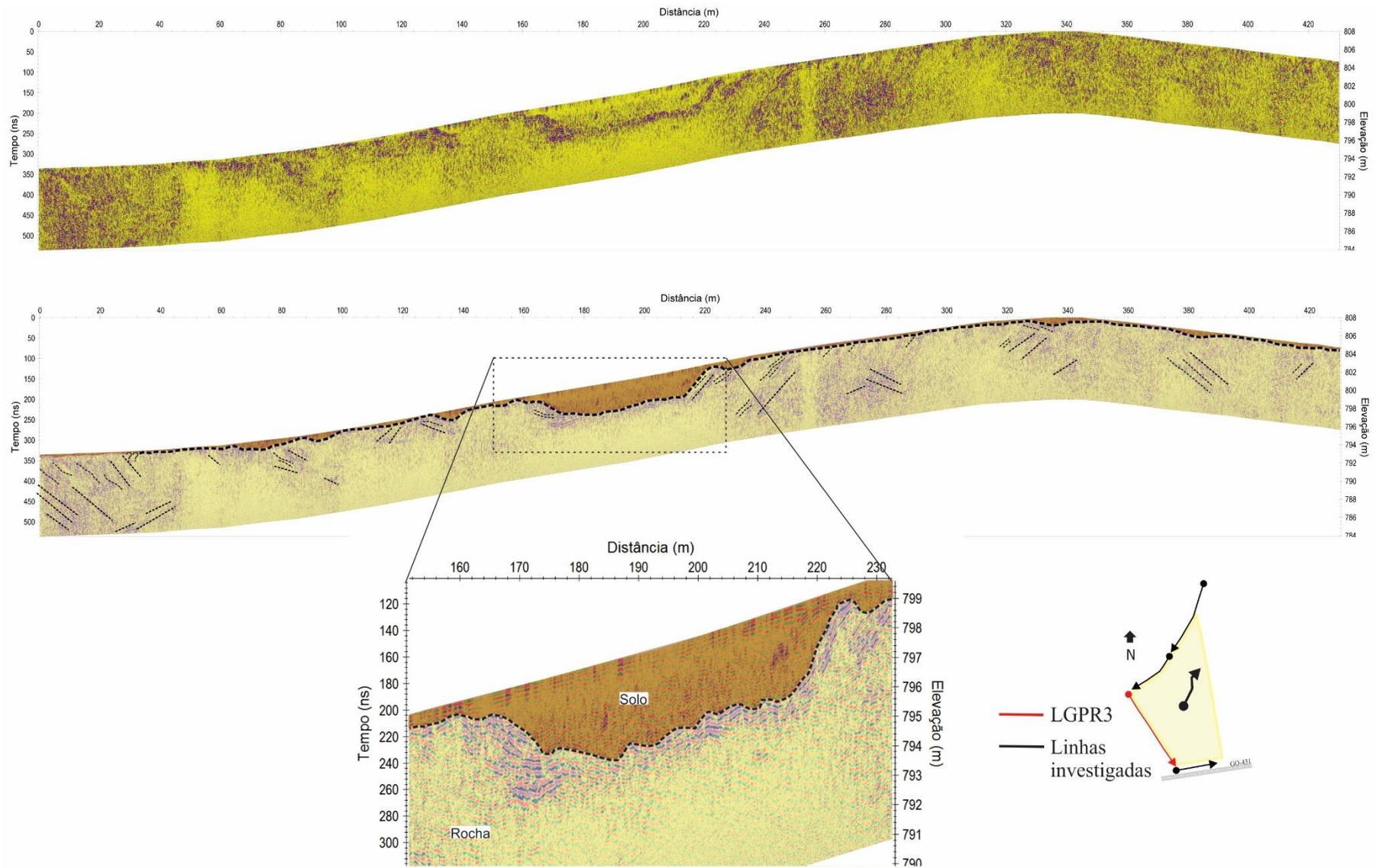
**Figura 4-6:** Parte da seção de LGPR5 com todos os padrões de reflexão (solo – PRS, rochas – PRR, lixo urbano – PRL, e percolado condutivo – PRC) identificados na área do Lixão de Pirenópolis/GO.



**Figura 4-7:** Seção de LGPR1 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas.



**Figura 4-8:** Seção de LGPR2 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas. Destaque para uma dobra entre a posição de 70 a 95 metros.



**Figura 4-9:** Seção de LGPR3 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas. Destaque para uma estrutura sinforme com uma maior espessura de solo.

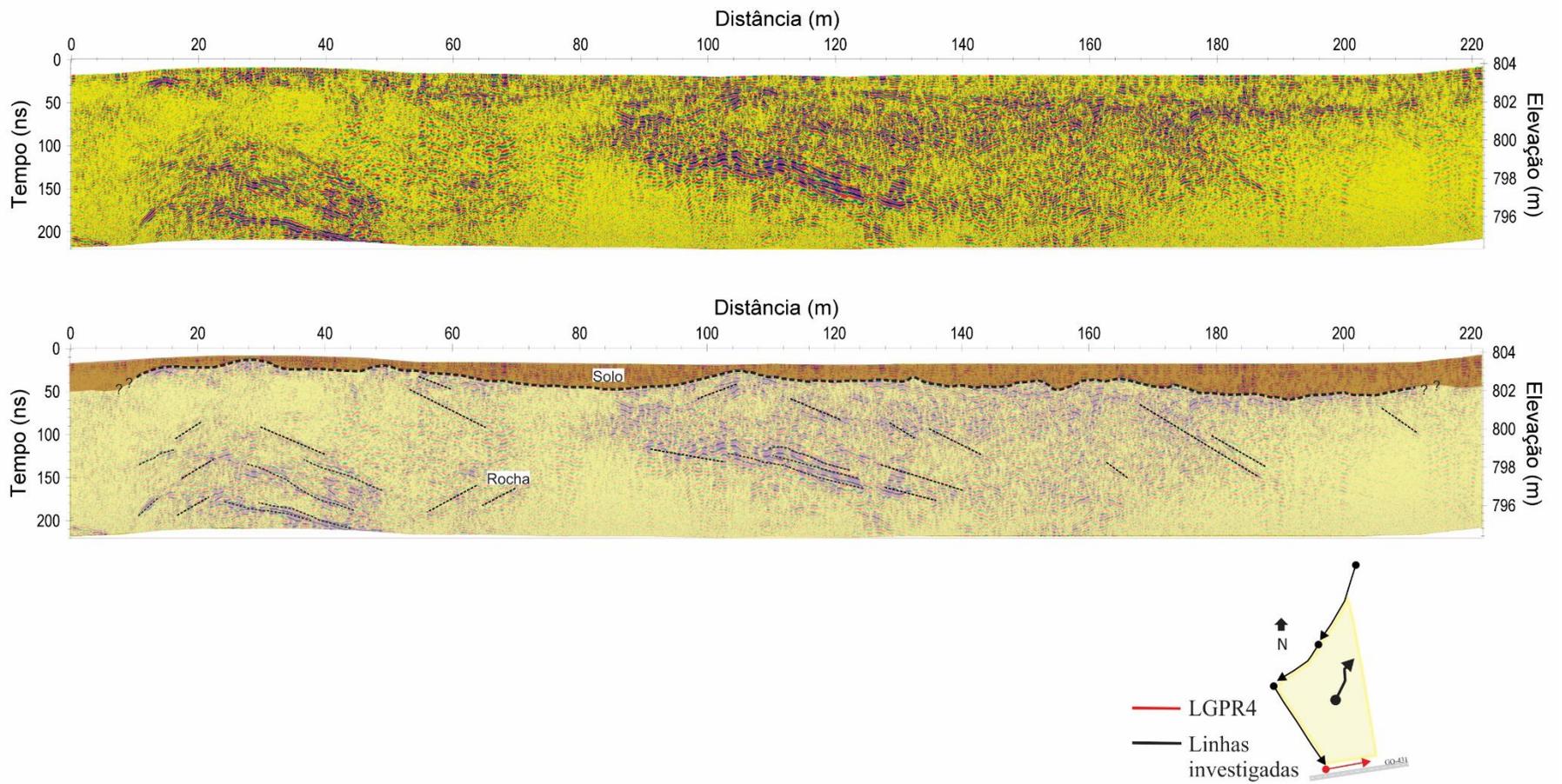


Figura 4-10: Seção de LGPR4 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas..

#### **4.4 CONCLUSÕES**

Na área do Lixão de Pirenópolis – GO, os resultados obtidos com o método GPR evidenciaram padrões de reflexão relacionados aos solos, às rochas, aos resíduos sólidos urbanos e ao material percolado pelo chorume.

O padrão de reflexão de média amplitude identificado para os solos, bem como a velocidade da onda eletromagnética calculada com as hipérboles de difração (0,09 m/ns) indicam um solo areno argiloso para a região. Conforme evidenciado em superfície, o solo presente na área é um latossolo vermelho arenoso, que possivelmente possui condutividade hidráulica superior ao definido na legislação ambiental para a instalação de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos.

Os refletores eletromagnéticos identificados no interior das rochas possibilitaram a determinação de foliações, e conseqüentemente a localização de estruturas geológicas deformacionais (dobras).

Em decorrência da baixa atenuação sofrida pelo sinal eletromagnético em ambientes arenosos, os perfis de GPR apresentaram excelentes resultados. A seleção de área designada para lixões/aterros deve observar a baixa permeabilidade do solo, a fim de reduzir as possibilidades de contaminação do aquífero. Além disto, as áreas selecionadas devem ter características argilosas, segundo a NBR 13.896 (ABNT, 1997). Em vista deste fato, sugere-se que a área do lixão seja conduzida para uma região de xistos, (que possui baixa permeabilidade) comumente encontrado nas redondezas.

Com ciência que o sinal eletromagnético atenua com maior intensidade em direção à área atual de deposição de resíduos, é possível afirmar que a contaminação não ultrapassa os limites do Lixão, visto que nos dados de GPR realizados nos arredores, não há regiões de atenuação do sinal.

#### 4.5 REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 13896 - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**, 1997. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=4829>>.
- ABNT. **NBR 16416 - Pavimentos Permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos.**, 2015.
- ALMEIDA, Leonardo de; RESENDE, Leonardo; RODRIGUES, Antônio Passos; *et al.* **Hidrogeologia do Estado de Goiás e Distrito Federal.**, 2006.
- ANNAN, A. Peter. Transmission Dispersion and GPR. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 4, p. 125–136, 1996.
- BERES, Milan; HAENI, F. P. Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies. **Groundwater**, v. 29, n. 3, p. 375–386, 1991.
- BORGES, Welitom Rodrigues; PORSANI, Jorge Luís. Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20, n. 3, p. 187–192, 2003.
- BUSBY, J P; CUSS, R J; RAINES, M G; *et al.* Application of Ground Penetrating Radar to geological investigations. **British Geological Survey**, v. 4, n. February, p. 1–4, 2004.
- CAVALCANTI, Marcio Maciel; BORGES, Welitom Rodrigues; STOLLBERG, Reiner; *et al.* Levantamento Geofísico (Eletrorresistividade) Nos Limites Do Aterro Controlado Do Jokey Clube, Vila Estrutural, Brasília-DF. **Geociências**, v. 33, n. October, p. 298–313, 2014.
- CHARLTON, Matthew; WHITE, Kathryn J. **Subsurface scattering of synthetic aperture radar signals assessed using ground-penetrating radar.**, 2006.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. Peter. Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, n. May 1988, p. 531–551, 1989.
- DAVIS, J.L; ANNAN, A.P. Applications of ground penetrating radar to mining, groundwater, and geotechnical projects: selected case histories. *In: Geological Survey in Canada, paper 90-4.*, 1988, p. p.49-55.
- DOMINIC, David F.; EGAN, Kathleen; CARNEY, Cindy; *et al.* Delineation of shallow stratigraphy using ground penetrating radar. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, n. 1–3, p. 167–175, 1995.
- DOURADO, João C.; MALAGUTTI FILHO, Walter; BRAGA, Antônio C.O.; *et al.* Detecção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR. **Journal of Geophysics**,

v. 19, n. 1, p. 19–32, 2001.

DOURADO, João Carlos; KIANG, Chang Hung; MALAGUTTI FILHO, Walter; *et al.* Utilização de radar de penetração no solo na detecção de estruturas artificiais rasas no solo. **Geociências**, v. 22, n. Especial, p. 75–81, 2003.

HUISMAN, J A; SNEPVANGERS, J J J C; BOUTEN, W; *et al.* Mapping spatial variation in surface soil water content : comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, v. 269, p. 194–207, 2002.

KRUSE, S. E.; SCHNEIDER, J. C.; CAMPAGNA, D. J.; *et al.* Ground penetrating radar imaging of cap rock, caliche and carbonate strata. **Journal of Applied Geophysics**, v. 43, n. 2–4, p. 239–249, 2000.

LAUREANO, Andreza Thiesen; SHIRAIWA, Shozo. Ensaio geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 2, p. 173–180, 2008.

MCT, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Zoneamento Ecológico-econômico de Arranjos produtivos de pequenos mineradores**, 2006.

MME/CPRM; SIC/FUNMINERAL/GO. **Geologia do Estado de de Goiás e do Distrito Federal.**, 2008.

ORTEGA, Rodrigo Alves. **Localização e Delineamento de Pluma de Contaminação por Hidrocarbonetos através dos Métodos GPR e Tomografia Elétrica**. Universidade de São Paulo, 2006.

SANDMEIER, K.J., 2015. REFLEXW Version 7.5, Windows 9x/2000/NT/7/8. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software, Karlsruhe, Germany, 209p

WENSINK, W A. Dielectric properties of wet soils in the frequency range 1 - 3000 MHz. **Geophysical Prospecting**, n. January, p. 671–696, 1993.

WIJEWARDANA, Y G N S; GALAGEDARA, L W. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1–2, p. 24–33, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.036>>.

## CAPÍTULO 5

### 5 ARTIGO 2

#### “APLICAÇÃO DE TOMOGRAFIA ELÉTRICA 2D NO MAPEAMENTO DA PLUMA DE CONTAMINAÇÃO DO LIXÃO DE PIRENÓPOLIS, GO”

**Resumo:**

A utilização de métodos elétricos nos estudos de contaminação de solos e águas subterrâneas apresentam resultados satisfatórios tanto nas fases de avaliação preliminar, quanto nas fases de monitoramento e remediação. Este trabalho descreve os procedimentos de campo e apresenta os resultados de eletrorresistividade realizados na área de descarte de resíduos sólidos do município de Pirenópolis, Goiás. O objetivo principal da pesquisa é verificar se há percolação de chorume em subsuperfície e averiguar sua eventual migração, através do método de eletrorresistividade. Na aquisição, foram adquiridas 22 seções com arranjo dipolo-dipolo, espaçamento de 10 metros dispostas no interior e nos limites da área do Lixão. Os resultados dos modelos de profundidade obtidos por inversão 2D dos dados elétricos caracterizam a pluma de contaminação através de zonas de baixas resistividades (abaixo de 100  $\Omega$ .m) e indicam a direção NW do fluxo da contaminação principal. Além disto, a análise dos dados possibilitou a distinção entre as camadas de solos (latossolos vermelhos) + saprólito e rochas da Unidade B do Grupo Araxá.

**Palavras-chave:** Resistividade elétrica, lixão de Pirenópolis, contaminação.

**Abstract:**

The use of methods in soil and groundwater contamination studies presents satisfactory results in the preliminary assessment phases, also in the monitoring and remediation phases. This study describes the field procedures and the results of geophysical tests in the area of solid waste disposal in Pirenópolis, Goiás. The main objective of the research is verify if there is percolation of manure in subsurface and to verify its possible migration, through the method of resistivity. 22 sections of eletrorresistivity with dipole-dipole array were obtained, spacing 10 meters with 20 levels of investigation, arranged in the interior and in the boundaries of the landfill area. The results of the 2D inversion depth models of the electrical data characterize the plume of contamination through zones of low resistivities (below 100  $\Omega.m$ ). and indicate a direction NW of the main contamination flow. In addition, an analysis of the data made it possible to distinguish the layers of Latossolo Vermelho and unit B of Grupo Araxá.

**Key words:** *Resistivity, Pirenopolis landfill, leachate.*

## 5.1 INTRODUÇÃO

O aumento da geração de lixo nos últimos anos deve-se a alguns fatores como o crescimento populacional nos centros urbanos, o acréscimo de consumo e o maior volume de embalagens dos produtos industrializados. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) aponta que os índices de disposição final de resíduos sólidos urbanos apresentaram retrocesso. Cerca de 59,8% dos municípios brasileiros ainda descarta resíduos de maneira indevida em lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessário para a proteção do meio ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2016).

A destinação inadequada de resíduos sólidos em lixões e aterros gera impactos ambientais e problemas à saúde pública devido à contaminação do solo e da água pela percolação de chorume. A contaminação pelo chorume é causada basicamente pelo lixiviamento dos metais pesados presentes nos resíduos sólidos que constituem o lixo urbano. Estes metais pesados, em conjunto com o líquido proveniente da decomposição de materiais orgânicos, apresentam pH alcalino, o que favorece a contaminação do subsolo, das águas superficiais e das águas subterrâneas (CANATA, 2015).

No diagnóstico ambiental recomenda-se o uso de técnicas geofísicas para a identificação de áreas potencialmente contaminadas. Os métodos geofísicos recomendados são a eletrorresistividade, as sísmicas de refração e de reflexão, o método magnético e os métodos eletromagnéticos (CETESB, 2010).

A utilização de métodos geoeletricos nos estudos de contaminação de solos e águas subterrâneas apresentam resultados satisfatórios tanto nas fases de avaliação preliminar, quanto nas fases de monitoramento e remediação. Os produtos finais minimizam custos de campo e apontam os locais mais adequados para a instalação de poços de monitoramento, além de apresentar informações geológicas e hidrogeológicas da área (BRAGA, 2016).

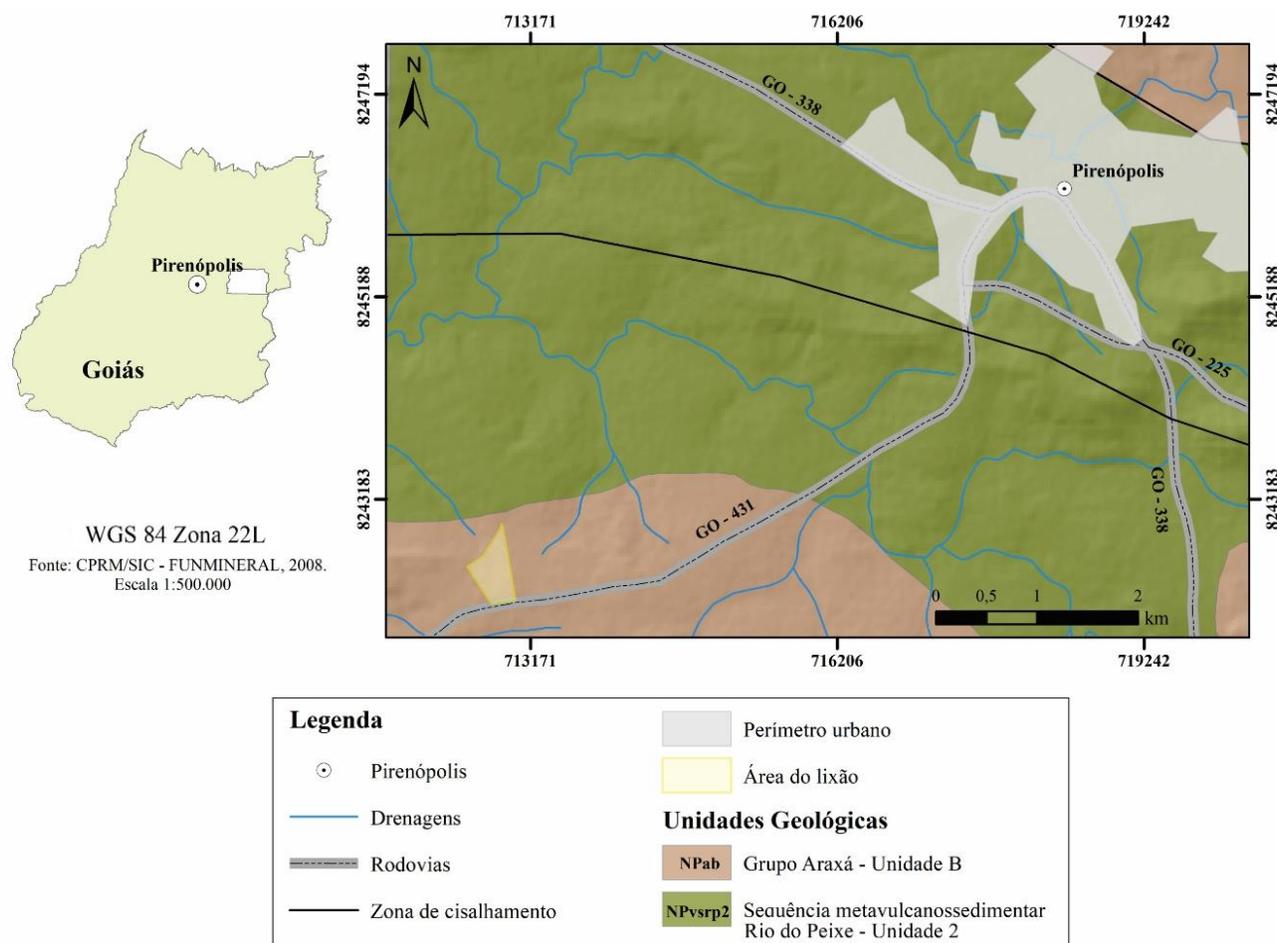
Os resultados de geofísica em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos mostram eficiência na identificação da pluma de contaminação de chorume (BORTOLIN; MALAGUTTI FILHO, 2010; CAVALCANTI et al., 2014; GALLAS et al., 2005; KHALIL; HASSAN, 2016; LOPES et al., 2012; OGILVY et al., 2002; OSINOWO; FALUFOSI; OMIYALE, 2018; PARK et al., 2016), na determinação da espessura dos resíduos sólidos (LAGO; ELIS; GIACHETI, 2006; OGILVY et al., 2002; WANG et al., 2015), na caracterização geotécnica do aterro (HERMOZILHA; GRANGEIA; MATIAS, 2010; LAGO et al., 2009; MOURA; MALAGUTTI FILHO, 2003a; VARGEMEZIS et al., 2015; VELOZO, 2006), na determinação de estruturas geológicas e hidrogeológicas (BRAGA; MALAGUTTI FILHO; DOURADO, 2006; CHAMBERS et al., 2006; KELLY, 1977; KHALIL, 2012; MAZAC; KELLY; LANDA, 1987; RUCKER; NOONAN; GREENWOOD, 2011).

No Brasil, o Ministério de Meio Ambiente, com a publicação da Lei n ° 12.305, instituiu que os municípios e os estados são responsáveis pela elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, que estabelece que os planos contemplem a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (MMA; ICLEI-BRASIL, 2012). Assim a maioria dos municípios brasileiros iniciou, a partir de 2013 a elaboração dos planos municipais de gerenciamento de resíduos sólidos.

O município de Pirenópolis, no ano de 2015, em parceria com a empresa Intergeo e com o Laboratório de Geofísica Aplicada, do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, efetuou uma campanha de eletrorresistividade na área do Lixão de Pirenópolis com o objetivo de determinar as áreas de percolação de chorume para o órgão ambiental municipal definir estratégias de contenção e remediação do contaminante.

A área de disposição de resíduos sólidos urbanos do município de Pirenópolis localiza-se em uma área rural, no lado esquerdo da rodovia GO-431, sentido Pirenópolis a Interlândia (Figura 5-1). O lixão possui uma área de 190.000 m<sup>2</sup>, e encontra-se em um alto topográfico, com o fluxo superficial em direção a um afluente da margem direita do Córrego Pinheiro.

Na região ocorrem rochas do Grupo Araxá (Unidade B) e da Sequência Metavulcanossedimentar Rio do Peixe (**Figura 5-1**). A Unidade B do Grupo Araxá é composta de quartzitos e granada-muscovita-biotita xistos, granada-clorita-muscovita xistos, calci-clorita-biotita xistos e intercalações de hornblenda-granada xisto feldspático, grafita xisto e lentes de metacalcários e quartzitos micáceos (MCT, 2006; SIC/FUNMINERAL/GO, 2008). A Unidade 2 da Sequência Metavulcanossedimentar Rio do Peixe é composta por quartzo xistos, quartzitos, xistos feldspáticos, micaxistos e anfibolitos subordinados.



**Figura 5-1:** Mapa geológico da área com a localização das seções de resistividade no Lixão Municipal de Pirenópolis-GO.

## 5.2 METODOLOGIA

Na pesquisa geofísica na área do Lixão optou-se pelo uso do método da eletrorresistividade em função do elevado sucesso do mesmo na determinação da espessura de depósitos de lixo (CARPENTER et al, 1990; BERNSTONE et al, 2000; KONSTANTAKI et al, 2015), na determinação da geometria de plumas de chorume (OGILVY et al, 2002; GRELLIER et al, 2008) e da caracterização geotécnica de aterros (SHIRAIWA et al, 2002; SOUPIOUS et al, 2007; FRID et al, 2008).

O propósito das investigações elétricas é determinar a distribuição da resistividade elétrica do subsolo realizando-se medidas na superfície do solo. As medidas de resistividade são realizadas injetando-se corrente em dois eletrodos e registrando-se o potencial em outros eletrodos. As investigações 2D são mais eficientes que as 1D e menos demoradas que as 3D, deste modo são as mais usadas em pesquisas ambientais e geotécnicas (LOKE, 2000).

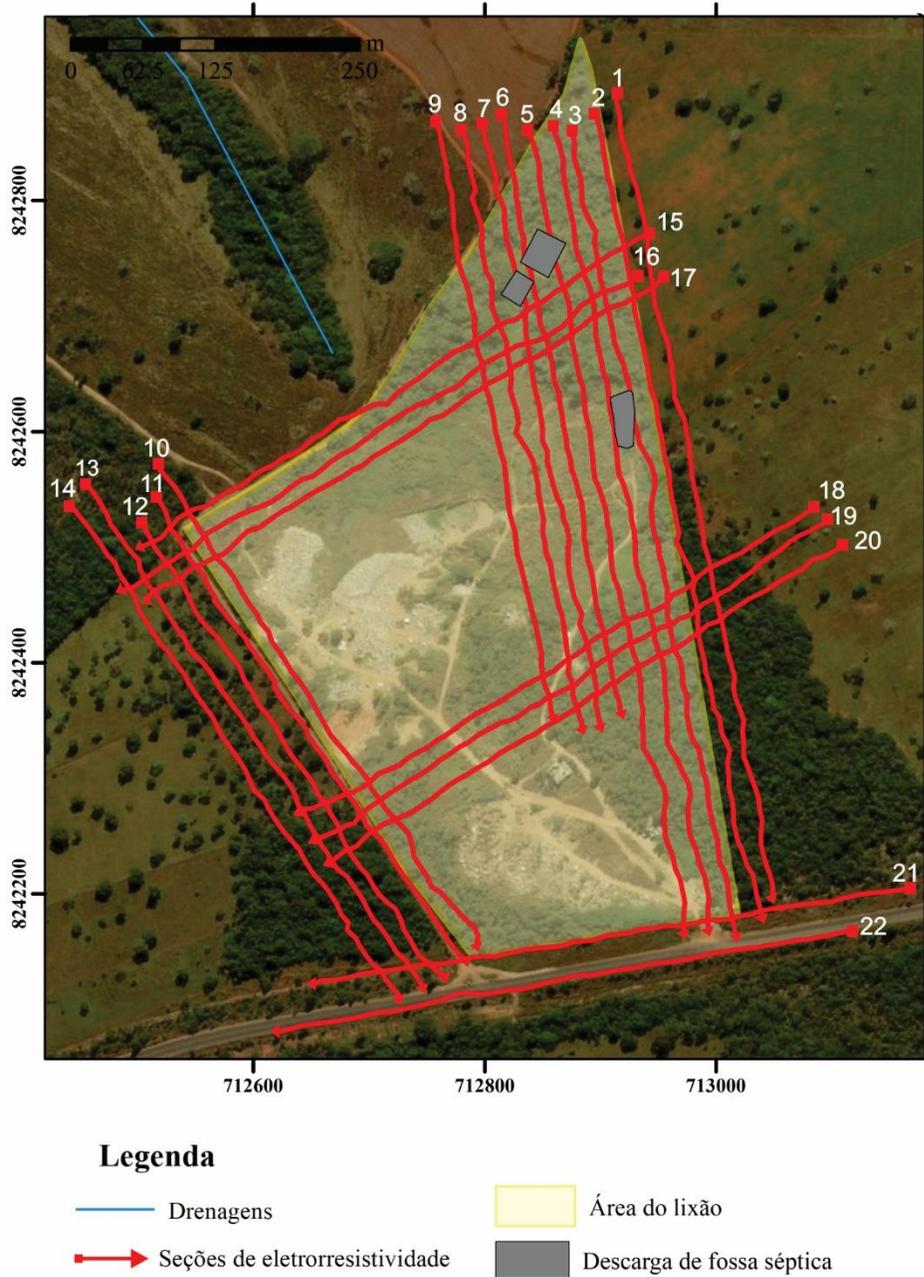
Na área do Lixão de Pirenópolis e arredores, adquiriram-se 22 seções de resistividade elétrica (**Figura 5-2**) para posteriormente compor um volume 3D de resistividade. A distribuição das linhas de eletrorresistividade ocorreu em função da disponibilidade de áreas livres de grandes pacotes de resíduos sólidos (pilhas de lixo), e de maneira que houvesse uma cobertura de todas as extremidades do Lixão, com o objetivo de verificar quaisquer percolações subterrâneas de chorume (plumas de contaminação) para fora da área.

Na aquisição de dados de eletrorresistividade utilizou-se o equipamento Syscal Pro 72 (*Iris Instruments*), com cabos multieletródicos (com conectores a cada 10 metros) de comprimentos de 530 e de 710 metros.

Para a elaboração do protocolo de registro de dados de campo usou-se o software Electre Pro, versão 2 (*Iris Instruments*, 2007). Assim programaram-se as aquisições com a técnica da tomografia elétrica 2D (caminhamento elétrico de alta resolução) usando-se o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre os dipolos de 10 metros, e 14 níveis de profundidade (7 níveis com espaçamento de 10 metros, e 7 níveis com espaçamento de 20 metros). As linhas com as dimensões de 530 a 710 metros de comprimento tiveram 616 a 947 pontos investigados por seção 2D de resistividade elétrica.

A visualização e filtragem dos dados brutos de resistividade elétrica ocorreram no software *Prosys II*, versão 3 (*Iris Instruments*, 2005). Na exclusão de dados espúrios (*spikes*) usou-se a função ‘*Exterminate bad data*’ do *Prosys*. Na sequência, em função do registro do potencial elétrico em ciclos

reversos de corrente, aplicou-se um filtro de conversão dos dados de resistividade para valores absolutos, e posteriormente exportou-se os dados para o formato do software *Res2dinv*.



**Figura 5-2:** Mapa com a localização das linhas de eletrorresistividade dentro da área do Lixão de Pirenópolis.

Para remover a dispersão do fluxo elétrico e obter-se modelos elétricos do meio usa-se o processo de modelagem inversa (ZHADANOV, 2002). Na modelagem dos dados de eletrorresistividade usou-se

o software *Res2dinv* versão 3.4 (GEOTOMO, 2002), que calcula um modelo de resistividade elétrica para o meio, usando-se os dados elétricos registrados em campo. Nesta etapa de modelagem usou-se a função ‘*change width blocks*’ que possibilita a mudança do tamanho da célula usada na rotina de inversão, no caso usou-se uma célula de 5 metros para otimizar o processo de inversão e remover *spikes* remanescentes nos dados.

Após a rotina de filtragem, seguiu-se com o processo matemático de inversão no próprio software, para a modelagem 2D de resistividade com finalidade de reconstruir as feições adequadas aos valores medidos. Nesta etapa utilizou-se a rotina de inversão robusta em função do esperado contraste abrupto de resistividade entre o chorume e as unidades geológicas e pedológicas.

Após a aplicação da rotina de inversão, realizou-se uma análise entre a variação do erro absoluto e o modelo obtido com o objetivo de verificar a quantidade ótima de iterações. A realização de oito iterações foi suficiente para a análise, já que os erros não diminuíram significativamente, após a quinta iteração (**Figura 5-3**). Deste modo, o resultado das inversões para os dados e resistividade elétrica tiveram um erro absoluto 27,27%, com exceção da linha 11 que obteve um erro mais alto de 58,58% com apenas 5 iterações.

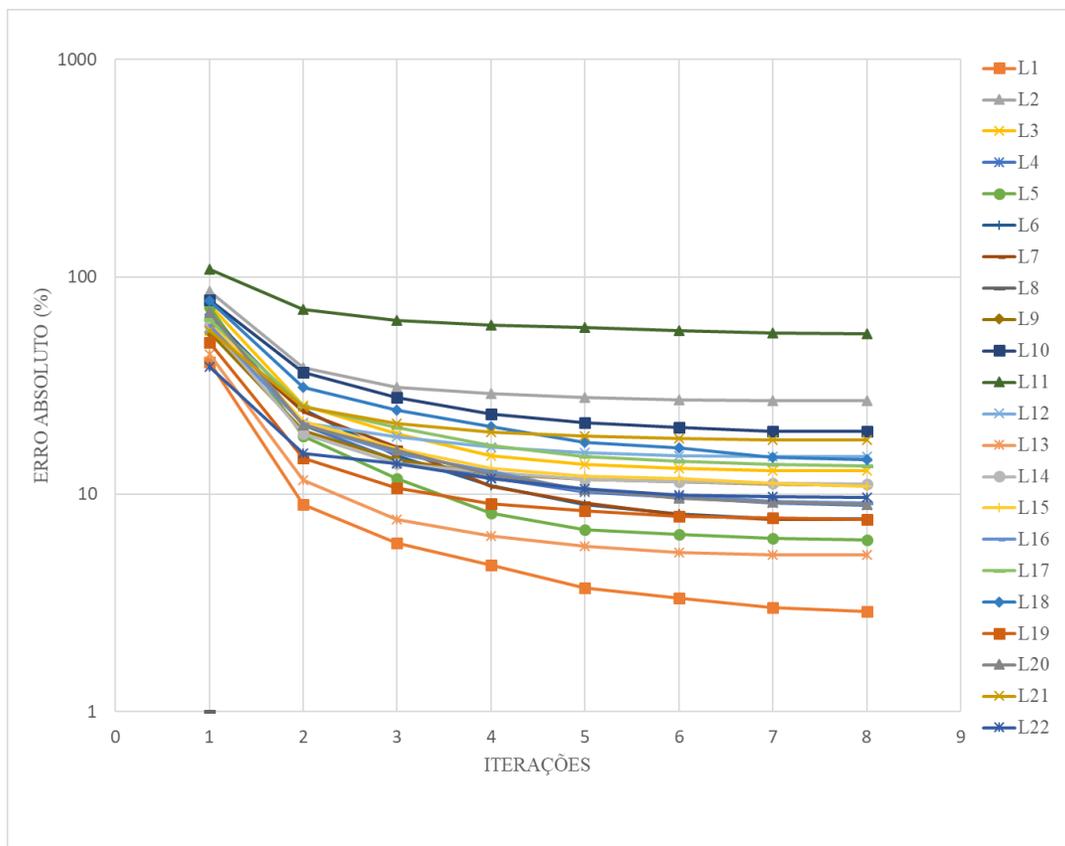


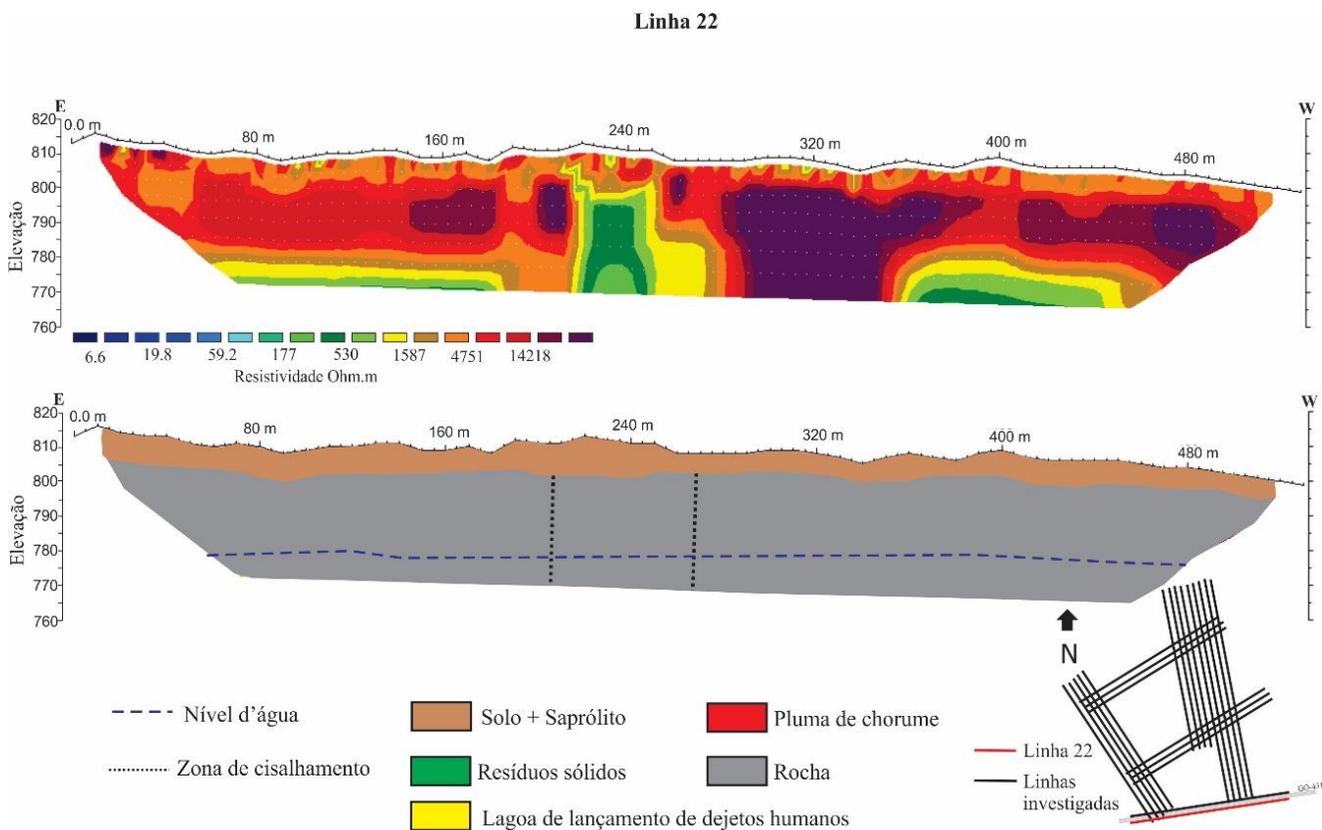
Figura 5-3: Gráfico indica o erro absoluto de resistividade elétrica após cada iteração no software Res2dinv.

### 5.3 RESULTADOS

Os valores de resistividade elétrica registrados em todas as seções de campo indicam um ambiente geológico altamente resistivo (média de 5676 Ohm.m e mediana de 2420 Ohm.m), característicos de ambientes com pouca cobertura pedológica e rochas metamórficas ou ígneas. Para melhor visualização dos resultados, optou-se por mostrar algumas seções 2D com os padrões característicos das camadas geoeletricas identificadas na área.

A presença de zonas mais condutivas, com anomalias típicas da presença de estruturas verticais caracterizam as zonas de falhas. A correlação inversa entre a condutividade hidráulica e a resistividade elétrica da rocha, sugerem que íons existentes na água contida em fraturas são condutores de corrente elétrica (ELIS; BARROSO; KIANG, 2004; FROHLICH; FISHER; SUMMERLY, 1996). Desta maneira, interpretou-se o nível d'água e algumas zonas de cisalhamento nas seções de resistividade elétrica em função das baixas resistividades e descontinuidades de padrões de resistividade.

Com o objetivo de determinar os padrões elétricos para as áreas não contaminadas (*background*) foi escolhida uma seção – Linha22 – adquirida ao lado oposto do Lixão da margem esquerda da GO-431, sentido Pirenópolis-Interlândia. A seção *background* (**Figura 5-4**), sem influência de contaminação, obteve um erro absoluto de 10,6% após 5 iterações e apresenta 2 camadas geolétricas: a primeira camada, possui geometria regular, ocorre desde a superfície até a profundidade máxima de 10 metros, com resistividade elétrica entre 1587 e 8218  $\Omega.m$ , interpretada como um solo mais arenoso – Latossolo Vermelho 1 (solo + saprólito); a segunda camada ocorre a partir da profundidade de 10 metros, com resistividade acima de 4751  $\Omega.m$ , interpreta-se esta camada como rochas do Grupo Araxá (possíveis quartzitos da Unidade B).

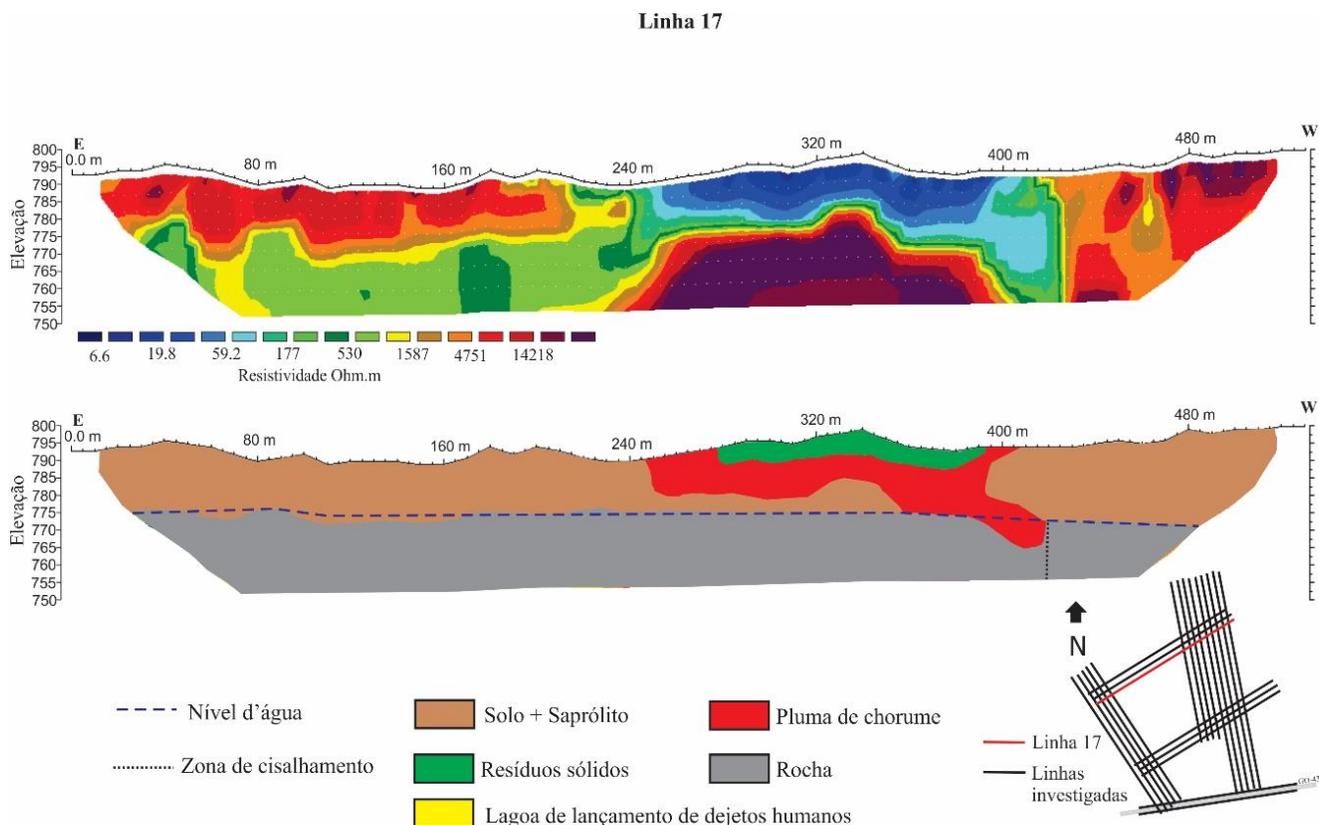


**Figura 5-4:** Modelo de resistividade elétrica da linha L22 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.

Conforme descrito na literatura (APPIAH et al., 2018; BAGCHI, 1987; BORTOLIN; MALAGUTTI FILHO, 2010; GALLAS et al., 2005; MOREIRA; BRAGA; FRIES, 2009; MOURA; MALAGUTTI FILHO, 2003; SHIRAIWA et al., 2002; SILVA et al., 2002), é viável estabelecer uma relação entre as zonas de resistividade mais baixas e contaminação por chorume. Esta associação é

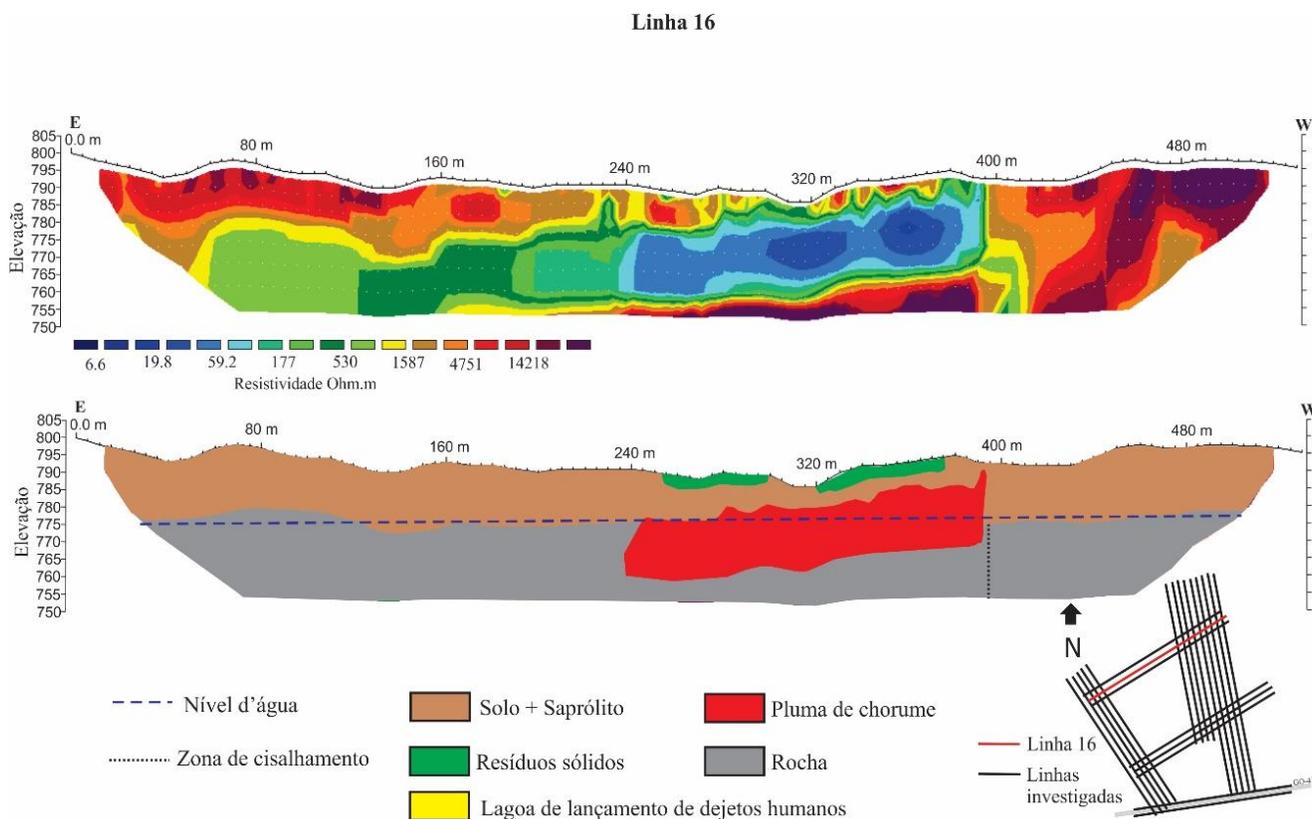
prevista, dado que o chorume é riquíssimo em íons e a condução da corrente elétrica em condições como as existentes na natureza ocorre principalmente de forma iônica. Assim, os substratos com um eletrólito rico em íons possibilitam uma propagação da corrente elétrica com maior facilidade, o que ocasiona a ocorrência de anomalias de baixa resistividade elétrica. Portanto, é possível apontar a existência de chorume abaixo das pilhas de resíduos, principalmente nas áreas com valores de resistividade elétrica inferiores a 100  $\Omega.m$ .

A seção da Linha 17 (**Figura 5-5**), adquirida sobre a pilha de resíduos, apresenta um erro absoluto de 14,1% com 5 iterações. A primeira camada possui uma geometria irregular e profundidade máxima de 5 metros, interpretada como uma pilha de resíduos sólidos. A camada seguinte ocorre na posição entre 250 e 400 metros da seção, com uma profundidade máxima de 25 metros, interpretada em função de sua posição espacial e valores de baixa resistividade (<100  $\Omega.m$ ), como uma pluma de chorume. Em seguida, o horizonte geolétrico, com profundidade máxima de 20 metros e resistividade entre 1587 e 8218  $\Omega.m$ , interpretado como solo+saprólito. Abaixo de todas estas camadas, ocorre um horizonte geolétrico com resistividade acima de 8218  $\Omega.m$ , interpretado como as rochas do Grupo Araxá.



**Figura 5-5:** Modelo de resistividade elétrica da linha L17 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade

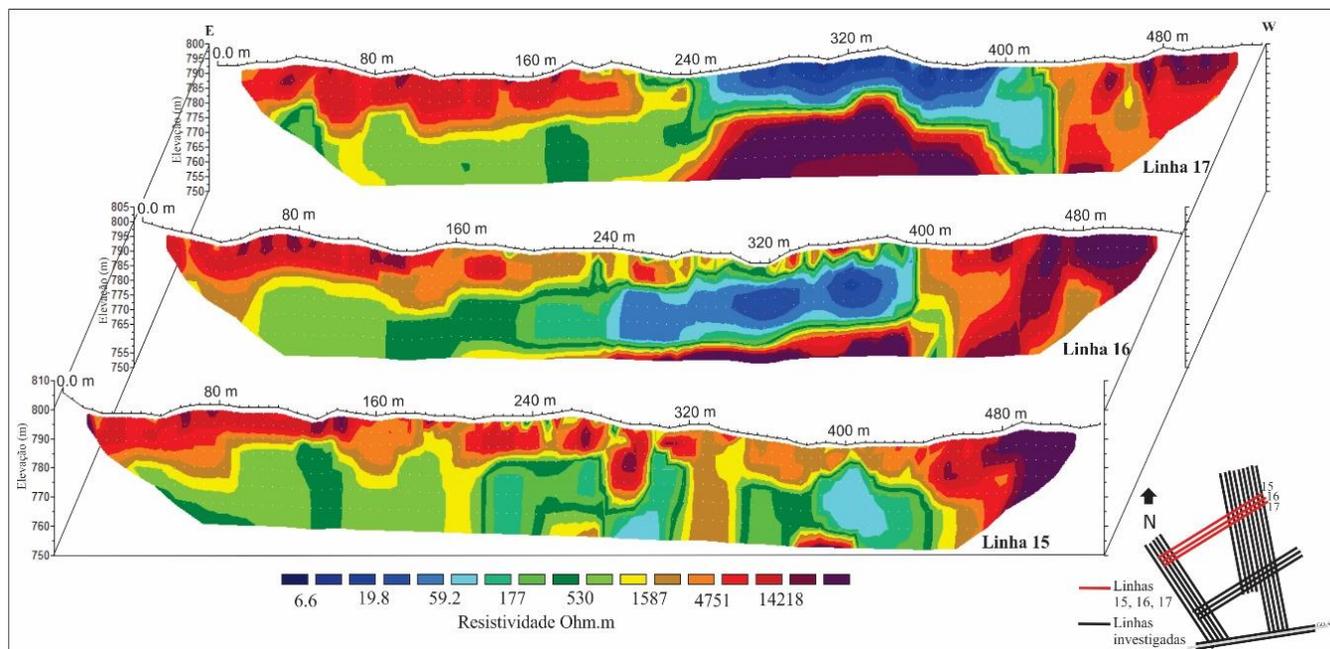
A **Figura 5-7** evidencia os resultados obtidos para a Linha 16, posicionada sobre a pilha de lixo e paralela a Linha 17. No processo de inversão o ajuste do modelo um erro absoluto de 10,3% na quinta iteração. O modelo de resistividade elétrica evidencia uma primeira camada geoeletrica que ocorre desde a superfície até a profundidade máxima de 4 metros, interpretada como os resíduos sólidos. A camada subsequente é interpretada como uma pluma de chorume (<100 Ω.m) e ocorre entre as profundidades de 10 a 30 metros. A terceira camada, com profundidade máxima de 20 metros e resistividade entre 1587 e 8218 Ω.m, interpreta-se como solo + saprólito. Em seguida, ocorre um horizonte geoeletrico com resistividade acima de 8218 Ω.m, interpretado como as rochas do Grupo Araxá.



**Figura 5-6:** Modelo de resistividade elétrica da linha L16 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.

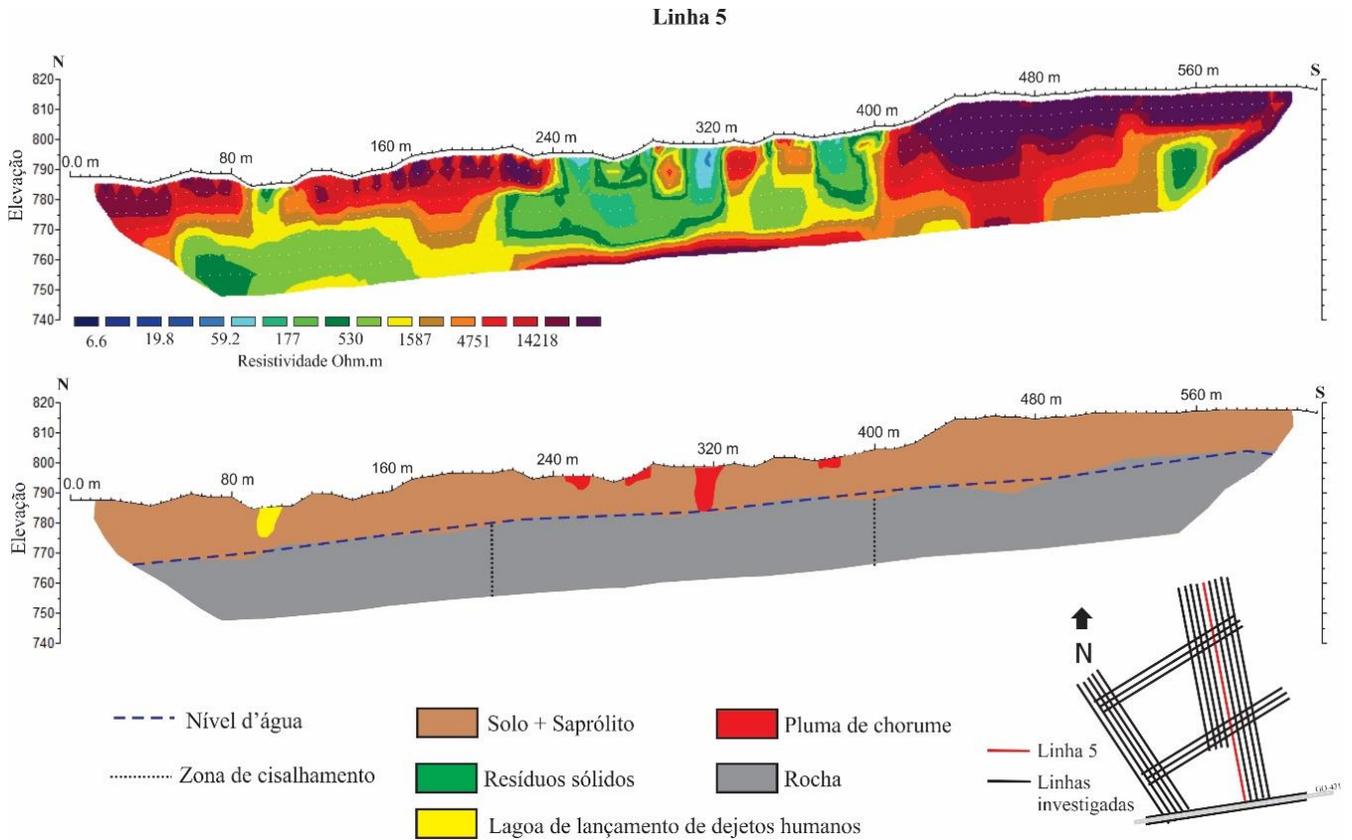
Os modelos geoeletricos das linhas 15, 16 e 17 (**Figura 5-7**), evidenciam uma zona anômala condutiva (resistividade elétrica entre 6,6 Ω.m e 100 Ω.m). Esta zona condutiva é interpretada como uma pluma de chorume proveniente da pilha de resíduos sólidos dispostos na área. Os resultados destas seções

evidenciam um aprofundamento da zona condutiva na seção 16, e uma redução de tamanho na seção 15, o que sugere uma restrita pluma de chorume na área.



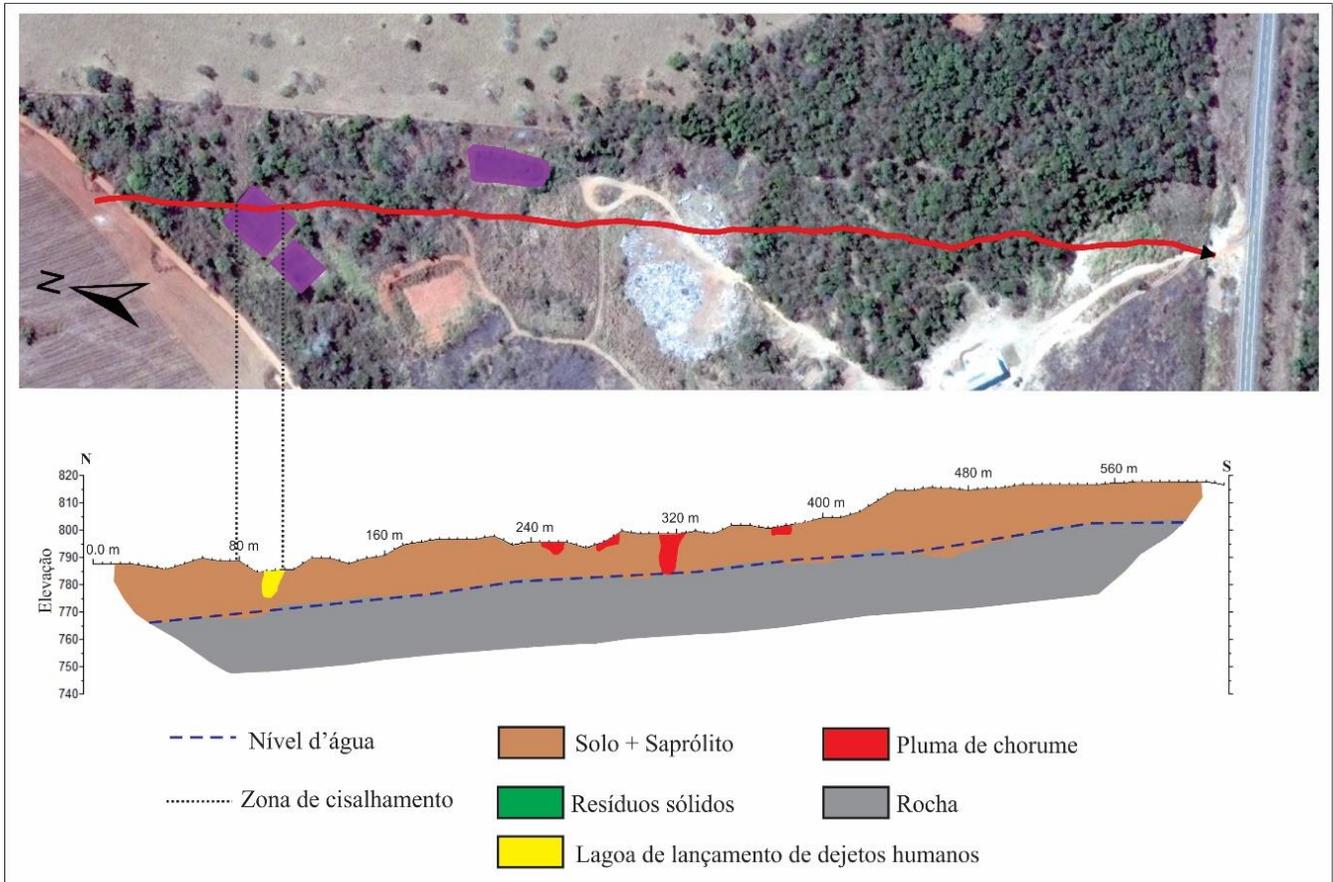
**Figura 5-7:** Seções de resistividade das linhas sobre a pilha de resíduos sólidos. Os menores valores de resistividade ( $< 100 \Omega.m$ ) definem a zona de percolação de chorume.

Dentro dos limites do Lixão há presença de três regiões de descarga de fossa séptica, onde caminhões despejam dejetos diariamente sem nenhum tipo de controle. Portanto, as linhas 5 e 6 cruzam estas “piscinas” de descarga de fossa séptica (**Figura 5-12**). Nota-se, entre as distâncias de 90 e 100 metros, uma anomalia (valor de resistividade 100 a 530  $\Omega.m$ ), que pode caracterizar uma contaminação pela descarga de fossa séptica dentro da zona não saturada. Esta anomalia identificada na seção é preenchida com cor amarela na seção (**Figura 5-8**). Este modelo foi corroborado pelo trabalho de NASCIMENTO et al. (1999), que utilizou o método de resistividade para monitorar e avaliar a migração de contaminantes em uma área de valas de infiltração para efluentes líquidos de fossa séptica e apresentou valores de 449,3 a 612,4  $\Omega.m$



**Figura 5-8:** Modelo de resistividade elétrica da linha L05 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.

A **Figura 5-9** enfatiza a correspondência da posição da linha 5 com o modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.



**Figura 5-9:** Modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade evidenciando a correlação da posição da seção sobre a piscina de descarga de fossa séptica.

Os resultados obtidos com a interpolação das seções de eletrorresistividade possibilitaram a elaboração de um bloco 3D de resistividade elétrica. Desta forma, optou-se pela apresentação na forma de mapas de resistividade elétrica em algumas profundidades (*depth slices*). Nos níveis de investigação 2 (profundidade de 4,67m), 3 (profundidade de 8,98m) e 5 (profundidade de 18,91m), nota-se, à noroeste, uma porção mais condutiva – 6 a 100  $\Omega.m$  (**Figura 5-10**). Esta zona condutiva migra em profundidade na direção NW, ou seja, apresenta uma diminuição da pluma em direção NW, como apresentado também na (**Figura 5-7**). Esta direção de migração possivelmente está relacionada ao gradiente hidráulico da região (**Figura 5-11**), evidenciando o caminho preferencial de fluxo subterrâneo.

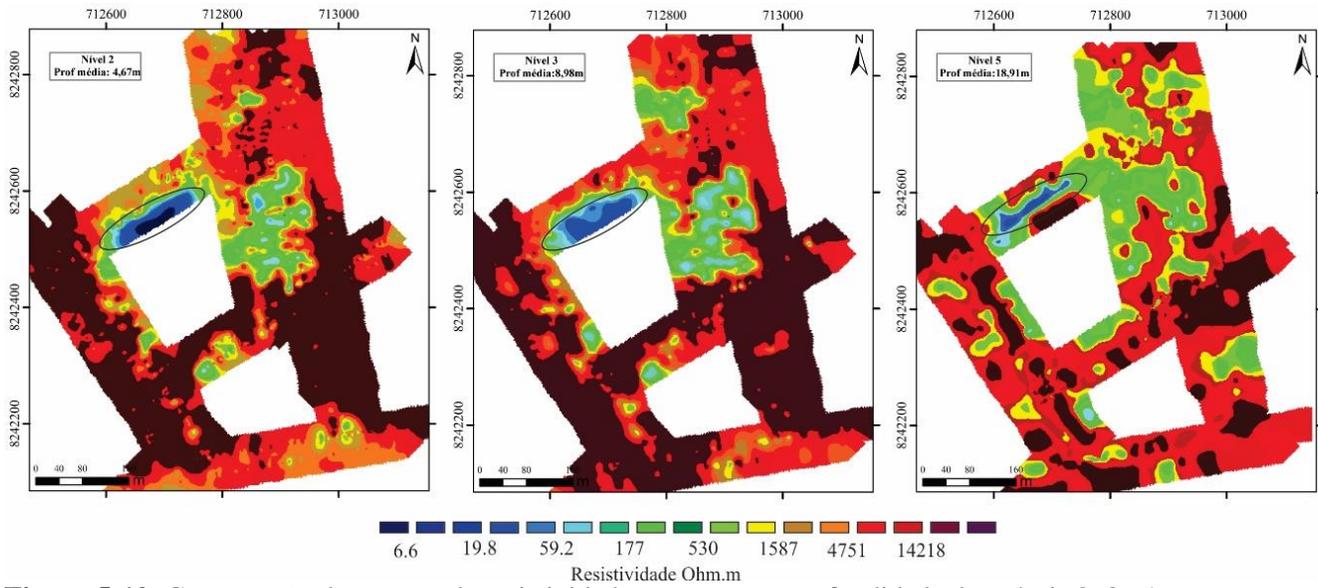


Figura 5-10: Comparação dos mapas de resistividade aparente em profundidade dos níveis 2, 3 e 5.

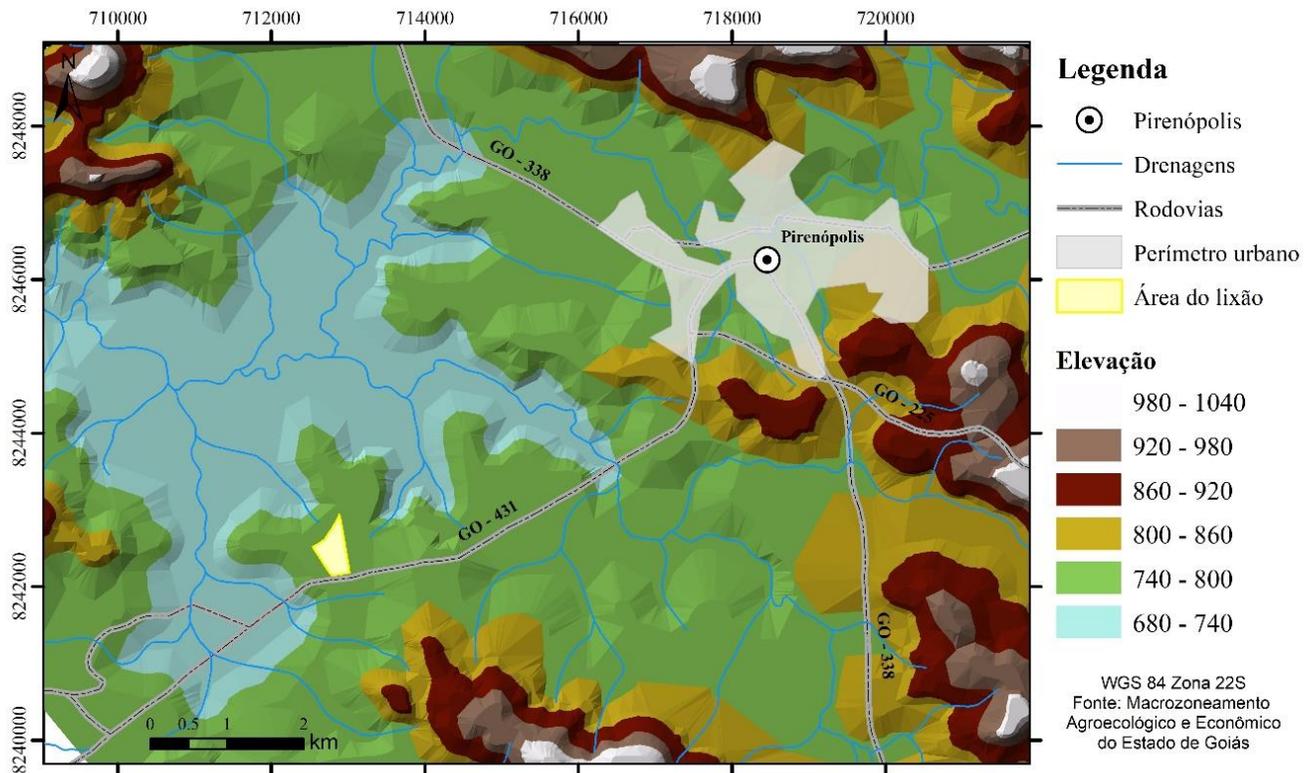
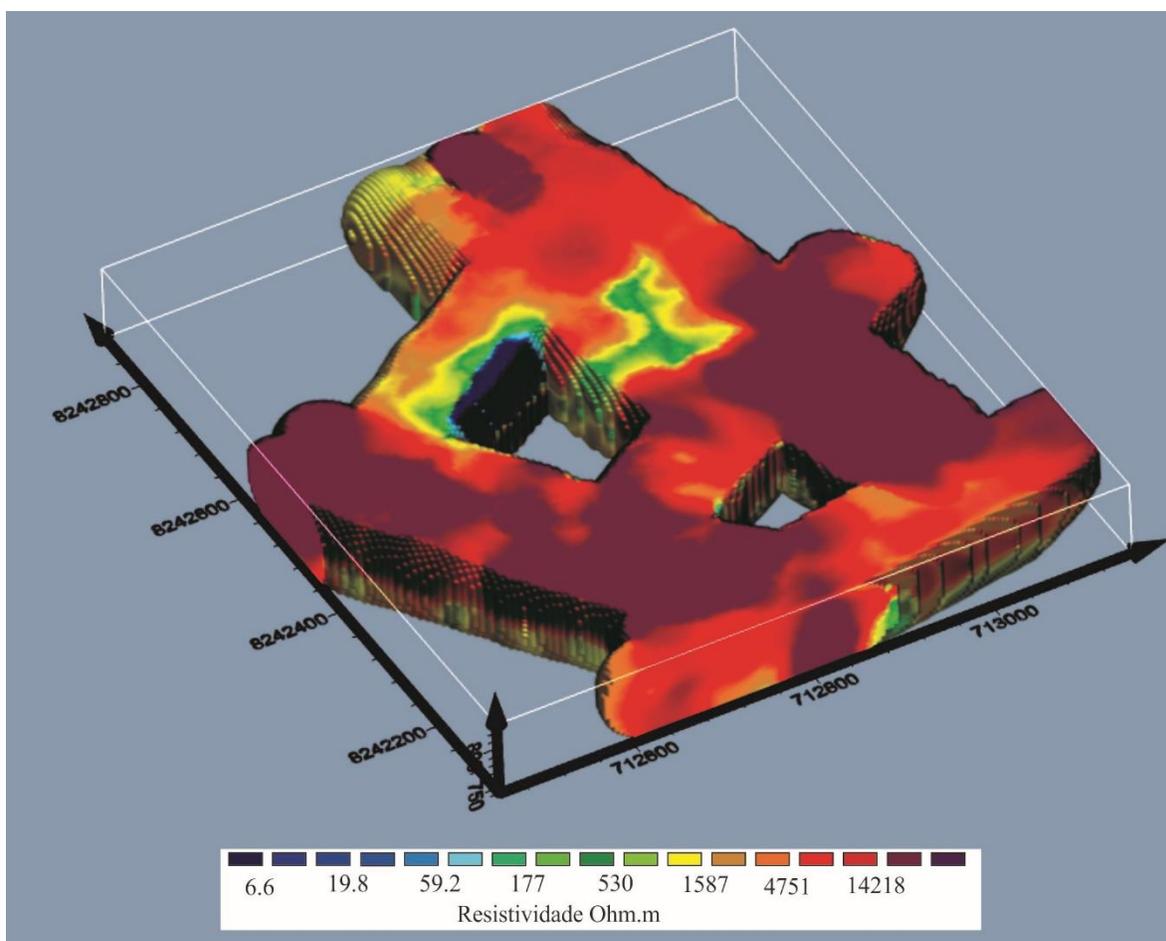


Figura 5-11: Mapa Topográfico da região da área de estudo.

Para visualizar o comportamento da resistividade na área de estudo foi construído um bloco 3D de resistividade. A **Figura 5-12** evidencia o comportamento geral da resistividade os valores de resistividade entre 6,6 e 102,4  $\Omega$ .m., que sugerem a contaminação do meio.

Estas zonas de alta condutividade estão diretamente relacionadas à lixiviação do chorume, visto que tem elevada quantidade de íons, permite que a corrente elétrica se propague com facilidade.



**Figura 5-12:** Bloco 3D de resistividade da área com destaque para a anomalia de baixa resistividade (cor azul) interpretada como zona de percolação de chorume.

#### 5.4 CONCLUSÕES

Os resultados de resistividade elétrica possibilitaram a distinção entre as camadas de solos (latossolos vermelhos) + saprólito e rochas da Unidade B do Grupo Araxá, além de identificar áreas possivelmente contaminadas pela percolação do chorume proveniente da lixiviação dos resíduos sólidos do Lixão de Pirenópolis.

A partir da associação dos dados é notório que o sentido do fluxo da contaminação principal é predominantemente para a direção NW da área pesquisada.

Na ausência de poços de monitoramento e de outras formas de investigação direta na área de estudo, a caracterização geológica, juntamente com a aplicação das técnicas geofísicas demonstram ser uma alternativa para caracterização e monitoramento em regiões de disposição de resíduos sólidos. No entanto, é aconselhável o uso de análise físico-químicas de amostras de solo e de água para identificar com maior eficiência os contaminantes e suas concentrações, para melhor interpretação e correlação com as respostas geofísicas

## 5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. São Paulo, 2016.

APPIAH, Isaac; WEMEGAH, David Dotse; ASARE, Van Dycke Sarpong; *et al.* Integrated geophysical characterisation of Sunyani municipal solid waste disposal site using magnetic gradiometry, magnetic susceptibility survey and electrical resistivity tomography. **Journal of Applied Geophysics**, v. 153, p. 143–153, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.02.007>>.

BAGCHI, Amalendu. Natural Attenuation Mechanisms of landfill leachate and effects of various factors on the mechanisms. **Waste Management & Research**, v. 5, p. 453–463, 1987.

BERNSTONE, C.; DAHLIN, T.; OHLSSON, T.; *et al.* DC-resistivity mapping of internal landfill structures : two pre-excavation surveys. **Environmental Geology**, v. 39 (3-4), n. January, p. 360–371, 2000.

BORTOLIN, José Ricardo Melges; MALAGUTTI FILHO, Walter. Electrical resistivity method applied in the temporal monitoring of the contamination plume in disposal area of urban solid waste **Eng Sanit Ambient**, v. 15, p. 367–374, 2010.

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. **Geofísica Aplicada: Métodos Geométricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BRAGA, Antonio Celso De Oliveira; MALAGUTTI FILHO, Walter; DOURADO, João C. Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 573–581,

2006.

CANATA, Rafael Espindola. **Métodos elétricos e eletromagnéticos no deliamento da pluma de contaminação do aterro sanitário de Guaratuba-PR**. Universidade Federal do Paraná, 2015.

CARPENTER, P.J; KAUFMANN, R.S.; PRICE, B. Use od Resistivity Sounding to Determine Landfill Structure. **Ground Water**, v. 28 No4, p. 569–575, 1990.

CAVALCANTI, Marcio Maciel; BORGES, Welitom Rodrigues; STOLLBERG, Reiner; *et al.* Levantamento Geofísico (Eletrorresistividade) Nos Limites Do Aterro Controlado Do Jokey Clube, Vila Estrutural, Brasília-DF. **Geociências**, v. 33, n. October, p. 298–313, 2014.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental-CETESB (2001) **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**, 2a.ed. Projeto de Cooperação Técnica Brasil-Alemanha/CETESB, São Paulo.

CHAMBERS, Jonathan E.; KURAS, Oliver; MELDRUM, Philip I.; *et al.* Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. **Geophysics**, v. 71, n. 6, p. B231–B239, 2006. Disponível em: <<http://library.seg.org/journals/doc/SEGLIB-home/jrnls/top.jsp?key=GPYSA7>>.

ELIS, Vagner Roberto; BARROSO, Carlos Mauricio Rocha; KIANG, Chang Hung. Aplicacao de ensaios de resistividade na caracterizacao do sistema squifero Barreiras / Marituba em Maceio–Al. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 22, n. 2, p. 101–113, 2004.

FRID, Vladimir; LISKEVICH, Gady; DOUDKINSKI, Dmitriy; *et al.* Evaluation of landfill disposal boundary by means of electrical resistivity imaging. **Enviromental Geology**, v. 53, p. 1503–1508, 2008.

FROHLICH, Reinhard K.; FISHER, John J.; SUMMERLY, E. Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill, Rhode Island, USA. **Journal of Applied Geophysics**, v. 35, n. 4, p. 249–259, 1996.

GALLAS, José Domingos Faraco; TAIOLI, Fabio; DA SILVA, Sandra Márcia Cesário Pereira; *et al.* Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 23, p. 6–10, 2005.

GEOTOMO. 2003. RES3DINV Version 3.4. for Windows 98/ME/2000/NT/XP. Rapid 3D resistivity; IP inversion using the least-squares method. User’s Manual, 66p.

- GRELLIER, Solenne; GUÉRIN, Roger; ROBAIN, Henri; *et al.* Monitoring of Leachate Recirculation in a Bioreactor Landfill by 2-D Electrical Resistivity Imaging. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 13, n. 4, p. 351–359, 2008.
- HERMOZILHA, H.; GRANGEIA, C.; MATIAS, M. Senos. An integrated 3D constant offset GPR and resistivity survey on a sealed landfill - Ilhavo, NW Portugal. **Journal of Applied Geophysics**, v. 70, n. 1, p. 58–71, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.11.004>>.
- IRIS INSTRUMENTS. 2005. Syscal R2: Operating Manual. Orleans, France. 72 p.
- KELLY, Willian E. Geoelectric Sounding for Estimating Aquifer Hydraulic Conductivity. **Ground Water**, v. 17, p. 420–425, 1977.
- KHALIL, Mohamed H. Magnetic, geo-electric, and groundwater and soil quality analysis over a landfill from a lead smelter, Cairo, Egypt. **Journal of Applied Geophysics**, v. 86, p. 146–159, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.08.004>>.
- KHALIL, Mohamed H; HASSAN, Noha A. Ground Magnetic , GPR , and Dipole-Dipole Resistivity for Landfill Investigation. **Scientific Research Publishing**, v. 2016, n. June, p. 828–848, 2016.
- KONSTANTAKI, Laura Amalia; GHOSE, Ranajit; DRAGANOV, Deyan; *et al.* Characterization of a heterogeneous landfill using seismic and electrical resistivity data. **Geophysics**, v. 80, n. 1, p. 13–25, 2015.
- LAGO, Alexandre Lisboa; ELIS, Vagner Roberto; BORGES, Welitom Rodrigues; *et al.* Geophysical investigation using resistivity and GPR methods: A case study of a lubricant oil waste disposal area in the city of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil. **Environmental Geology**, v. 58, n. 2, p. 407–417, 2009.
- LAGO, Alexandre Lisboa; ELIS, Vagner Roberto; GIACHETI, Heraldo Luiz. Aplicacao Integrada De Métodos Geofísico Em Uma Área De Disposicao De Resíduos Sólidos Urbanos Em Bauru-Sp. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 357–374, 2006.
- LOPES, Deize Dias; SILVA, Sandra M C P; FERNANDES, Fernandes; *et al.* Geophysical technique and groundwater monitoring to detect leachate contamination in the surrounding area of a landfill - Londrina (PR - Brazil). **Journal of Environmental Management**, v. 113, p. 481–487, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.028>>.
- MAZAC, O.; KELLY, W. E.; LANDA, I. Surface geoelectrics for groundwater pollution and

protection studies. **Journal of Hydrology**, v. 93, n. 3–4, p. 277–294, 1987.

MCT, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Zoneamento Ecológico-econômico de Arranjos produtivos de pequenos mineradores.**, 2006.

MMA, Ministério Do Meio Ambiente; ICLEI-BRASIL. **Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação**, 2012.

MME/CPRM; SIC/FUNMINERAL/GO. **Geologia do Estado de de Goiás e do Distrito Federal.**, 2008.

MOREIRA, César Augusto; BRAGA, Antonio Celso de Oliveira; FRIES, Maximilian. Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 2, p. 283–293, 2009.

MOURA, Helyelson Paredes; MALAGUTTI FILHO, Walter. Métodos de Eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro controlado de Rio Claro - SP. **Revista de Geociências**, v. 2, p. 129–139, 2003.

MOURA, Helyelson Paredes; MALAGUTTI FILHO, Walter. Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro controlado de Rio Claro-SP. **Geociências**, v. 2, p. 129–139, 2003.

NASCIMENTO, Carlos T C; KOIDE, Sérgio; PIRES, Augusto C B; *et al.* Pseudo-Seções Elétricas Na Avaliação Da Contaminação Do Subsolo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 4, p. 621–626, 1999.

OGILVY, Richard; MELDRUM, Philip; CHAMBERS, Jon; *et al.* The Use of 3D Electrical Resistivity Tomography to Characterise Waste and Leachate Distribution within a Closed Landfill, Thriplow, UK. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 7, n. 1, p. 11, 2002. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/JEEGXX/v7/i1/p11/s1&Agg=doi>>.

OSINOWO, Olawale Olakunle; FALUFOSI, Michael Oluseyi; OMIYALE, Eniola Oluwatosin. Integrated electromagnetic (EM) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) geophysical studies of environmental impact of Awotan dumpsite in Ibadan, southwestern Nigeria. **Journal of African Earth Sciences**, v. 140, p. 42–51, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.12.026>>.

PARK, Samgyu; YI, Myeong Jong; KIM, Jung Ho; *et al.* Electrical resistivity imaging (ERI)

monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. **Journal of Applied Geophysics**, v. 135, p. 1–7, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004>>.

PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO – PNSB. 2008. Instituto Brasileiro de Estatística (IBGE). Rio de Janeiro 2010.

RUCKER, Dale F.; NOONAN, Gillian E.; GREENWOOD, William J. Electrical resistivity in support of geological mapping along the Panama Canal. **Engineering Geology**, v. 117, n. 1–2, p. 121–133, 2011.

SHIRAIWA, Shozo; LISOVSKY, Solange Pereira; ELIS, Vagner Roberto; *et al.* Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil - Resultados preliminares. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20, n. 3, p. 181–186, 2002.

SILVA, Jorge Eduardo; LOPES LOUREIRO, Elaine Maria; ELIS, Vagner Roberto; *et al.* Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em problema de poluição ambiental. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20, n. 3, p. 193–198, 2002.

SOUPIOS, Pantelis; PAPADOPOULOS, Ilias; KOULI, Maria; *et al.* Investigation of waste disposal areas using electrical methods : a case study from Chania , Crete, Greece. **Environmental Geology**, v. 51, p. 1249–1261, 2007.

VARGEMEZIS, George; TSOURLLOS, Panayiotis; GIANNOPOULOS, Antonios; *et al.* 3D electrical resistivity tomography technique for the investigation of a construction and demolition waste landfill site. **Studia Geophysica et Geodaetica**, v. 59, n. 3, p. 461–476, 2015.

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

WANG, Tzu Pin; CHEN, Chien Chih; TONG, Lun Tao; *et al.* Applying FDEM, ERT and GPR at a site with soil contamination: A case study. **Journal of Applied Geophysics**, v. 121, p. 21–30, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.07.005>>.

ZHADANOV, M. **Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems**. 1 st Edition, Elsevier Science, 2002.

## CAPÍTULO 6

### 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 6.1 CONCLUSÕES

O método *ground penetrating radar* mostrou-se eficiente para identificação de estruturas geológicas rasas (dobras), caracterização do topo rochoso e determinação de áreas impróprias para disposição de resíduos sólidos.

Em decorrência da baixa atenuação sofrida pelo sinal eletromagnético em ambientes arenosos, os perfis de GPR apresentaram excelentes resultados. Em contrapartida, a seleção de área designada para lixões/aterros deve haver impermeabilidade natural, a fim de reduzir as possibilidades de contaminação do aquífero. Além disso, as áreas selecionadas devem ter características argilosas, segundo a NBR 13.896 (ABNT, 1997). Em vista deste fato, sugere-se que a área do lixão seja conduzida para uma região de xistos, (que possui baixa permeabilidade) comumente encontrado nas redondezas.

Com ciência que o sinal eletromagnético atenua com maior intensidade em direção à área atual de deposição de resíduos, é possível afirmar que a contaminação não ultrapassa os limites do Lixão, visto que nos dados não há regiões de atenuação do sinal.

As seções de eletrorresistividade justificaram sua eficiência, podendo investigar o comportamento da pluma de contaminação em ambientes arenosos.

Os resultados possibilitaram a distinção entre as camadas de pluma de contaminação, resíduos sólidos, solo (latossolos vermelho) + saprólito, rocha (Unidade B do Grupo Araxá).

A partir da associação dos dados é notório que o sentido do fluxo da contaminação principal é predominante para NW, em direção ao afluente do Córrego Pinheiros.

Na ausência de poços de monitoramento e de outras formas de investigação direta na área de estudo, a caracterização geológica, juntamente com a aplicação das técnicas geofísicas demonstram ser uma alternativa para caracterização e monitoramento em regiões de disposição de resíduos sólidos. No entanto, é aconselhável o uso de análise físico-químicas de amostras de solo e de água para identificar com maior eficiência os contaminantes e suas concentrações, para melhor interpretação e correlação com os parâmetros geofísicos

## 6.2 RECOMENDAÇÕES

Com intuito de diminuir o impacto ambiental causado pela disposição de resíduos de forma inadequada, recomenda-se, como medidas de monitoramento e proteção das águas superficiais e subterrâneas da região, a instalação de poços de monitoramento.

Além disto, considerando a possibilidade de risco à saúde humana ou ecossistema, recomenda-se o isolamento da área, construção de sistema de drenagem de chorume e de gases que possibilitem a coleta de biogás e monitoramento técnico topográfico e hidrogeológico.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Leonardo de; RESENDE, Leonardo; RODRIGUES, Antônio Passos; *et al.* **Hidrogeologia do Estado de Goiás e Distrito Federal.**, 2006.

ANNAN, A. Peter. Transmission Dispersion and GPR. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 4, p. 125–136, 1996.

BORGES, Welitom Rodrigues. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade.** Unniversidade de São Paulo, 2002.

BORGES, Welitom Rodrigues (IAG/USP). **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente : Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG / USP.** Universidade de São Paulo, 2007.

BORTOLIN, José Ricardo Melges. **Monitorameto temporal da pluma de contaminação do aterro controlado de Rio Claro (SP) por meio de método de eletrorresistividade.** Universidade Estadual Paulista, 2009.

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. **Geofísica Aplicada: Métodos Geoelétricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

CANATA, Rafael Espindola. **Métodos elétricos e eletromagnéticos no deliamento da pluma de contaminação do aterro sanitário de Guaratuba-PR**. Universidade Federal do Paraná, 2015.

CAVALCANTI, Márcio Maciel. **Aplicação de métodos geoelétricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do aterro controlado do Jockey Clube de Brasília**. Universidade de Brasília, 2013.

CHAMBERS, Jonathan E.; KURAS, Oliver; MELDRUM, Philip I.; *et al.* Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. **Geophysics**, v. 71, n. 6, p. B231–B239, 2006. Disponível em: <<http://library.seg.org/journals/doc/SEGLIB-home/jrnls/top.jsp?key=GPYSA7>>.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. Peter. Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, n. May 1988, p. 531–551, 1989.

EDWARDS, L. S. A modified pseudosection for resistivity and IP. **Geophysics**, v. 42, n. 5, p. 1020–1036, 1977. Disponível em: <<http://library.seg.org/doi/10.1190/1.1440762>>.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013.

JOL, Harry M. **Ground Penetrating Radar Theory and Applications**.: Elsevier, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444533487000193>>. Acesso em: 28 mar. 2018.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **An Introduction to Geophysical Exploration**. Third Edit., 1986.

KELLER, G.V. Rock and Mineral Properties. Investigations in Geophysics, n3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. *In: Investigations in Geophysics. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*: Society of Exploration Geophysicist, Ed Misac N. Nabighian, 1987, p. 13–51.

LAGO, Alexandre Lisboa. **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**. Universidade de São Paulo, 2009.

LAGO, Alexandre Lisboa; ELIS, Vagner Roberto; BORGES, Welitom Rodrigues; *et al.* Geophysical investigation using resistivity and GPR methods: A case study of a lubricant oil waste disposal area in

the city of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil. **Environmental Geology**, v. 58, n. 2, p. 407–417, 2009.

LAGO, Alexandre Lisboa; ELIS, Vagner Roberto; GIACHETI, Heraldo Luiz. Aplicação Integrada De Métodos Geofísicos Em Uma Área De Disposição De Resíduos Sólidos Urbanos Em Bauru-Sp. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 357–374, 2006.

LATRUBESSE, Edgardo Manuel; CARVALHO, Thiago Morato de. **Geomorfologia Goiás e Distrito Federal**. Goiânia: Secretaria de Indústria de Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração, 2006.

LOKE, M.H. **Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys.**, 2001.

LOPES, Deize Dias; SILVA, Sandra M C P; FERNANDES, Fernandes; *et al.* Geophysical technique and groundwater monitoring to detect leachate contamination in the surrounding area of a landfill - Londrina (PR - Brazil). **Journal of Environmental Management**, v. 113, p. 481–487, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.028>>.

MCT, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Zoneamento Ecológico-econômico de Arranjos produtivos de pequenos mineradores.**, 2006.

MMA, Ministério Do Meio Ambiente; ICLEI-BRASIL. **Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação**, 2012.

MME/CPRM; SIC/FUNMINERAL/GO. **Geologia do Estado de de Goiás e do Distrito Federal**. [s.l.: s.n.], 2008.

MOURA, Helyelson Paredes; MALAGUTTI FILHO, Walter. Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro controlado de Rio Claro-SP. **Geociências**, v. 2, p. 129–139, 2003.

NBR, Abnt. NBR 15935 Investigações ambientais - Aplicação de métodos geofísicos. 2011.

OGILVY, Richard; MELDRUM, Philip; CHAMBERS, Jon; *et al.* The Use of 3D Electrical Resistivity Tomography to Characterise Waste and Leachate Distribution within a Closed Landfill, Thriplow, UK. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 7, n. 1, p. 11, 2002. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/JEEGXX/v7/i1/p11/s1&Agg=doi>>.

OLHOEFT, Gary R. Maximizing the information return from ground penetrating radar. **Journal of Applied Geophysics**, v. 43, n. 2–4, p. 175–187, 2000.

PARK, Samgyu; YI, Myeong Jong; KIM, Jung Ho; *et al.* Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. **Journal of Applied Geophysics**, v. 135, p. 1–7, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004>>.

PORSANI, Jorge Luís. **Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP**. Universidade Estadual Paulista, 1999.

REYNOLDS, John M. **An Introduction to Applied and Enviromental Geophysics**. England, 1997.

RUCKER, Dale F.; NOONAN, Gillian E.; GREENWOOD, William J. Electrical resistivity in support of geological mapping along the Panama Canal. **Engineering Geology**, v. 117, n. 1–2, p. 121–133, 2011.

TELFORD, W. M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. Second Edi: Cambridge University, 1990.

TOPP, G.C; DAVIS, J.L; ANNAN, A.P. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measruements in Coaxial Transmission Lines. **Water Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 574–582, 1980.

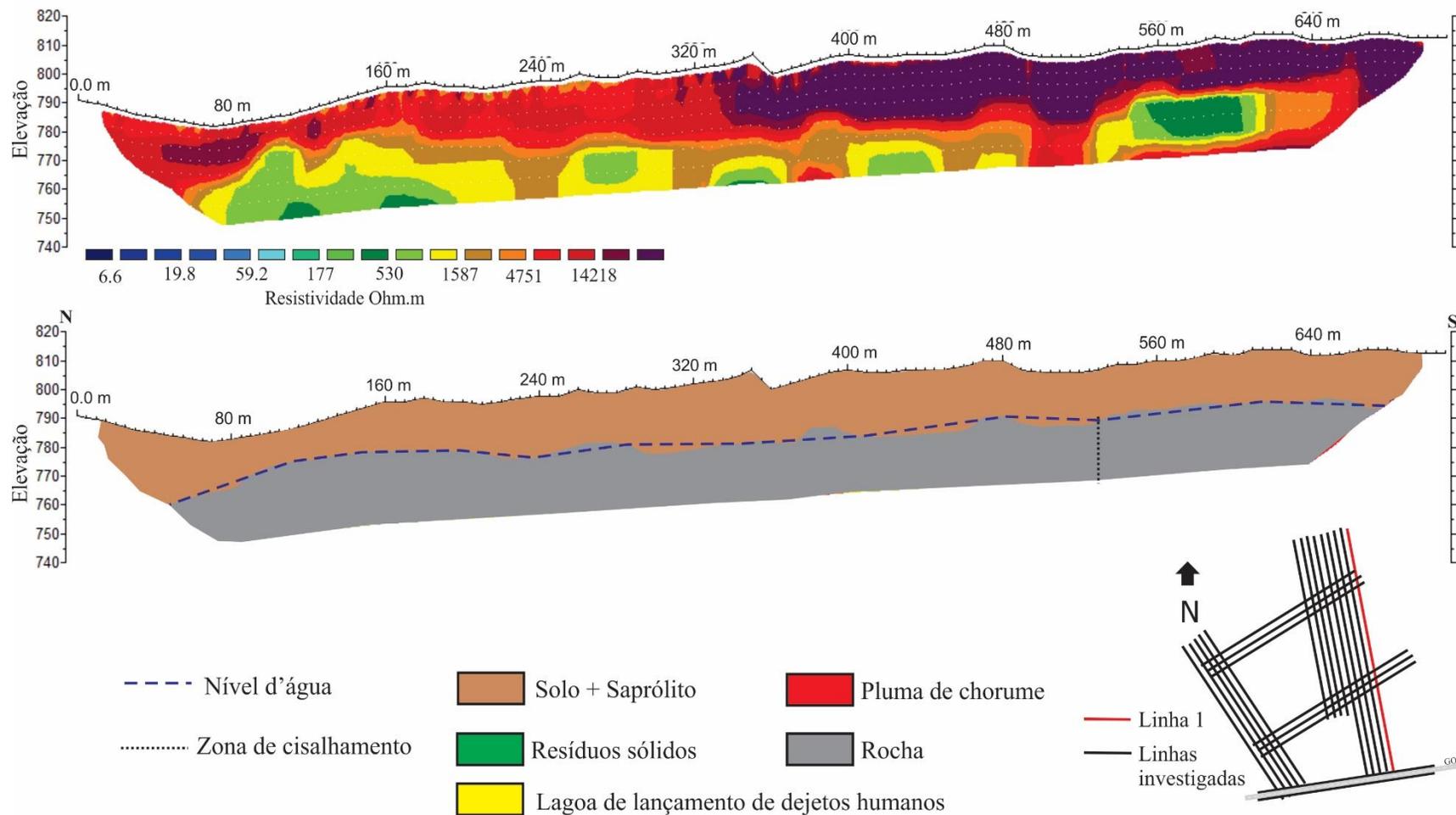
VELOZO, R. **Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos-SP , com auxílio da geofísica**. Universidade de São Paulo, 2006.

WARD, Stanley H.; HOHMANN, Gerald W. Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics**, p. 130–311, 1988. Disponível em: <<http://library.seg.org/doi/10.1190/1.9781560802631.ch4>>.

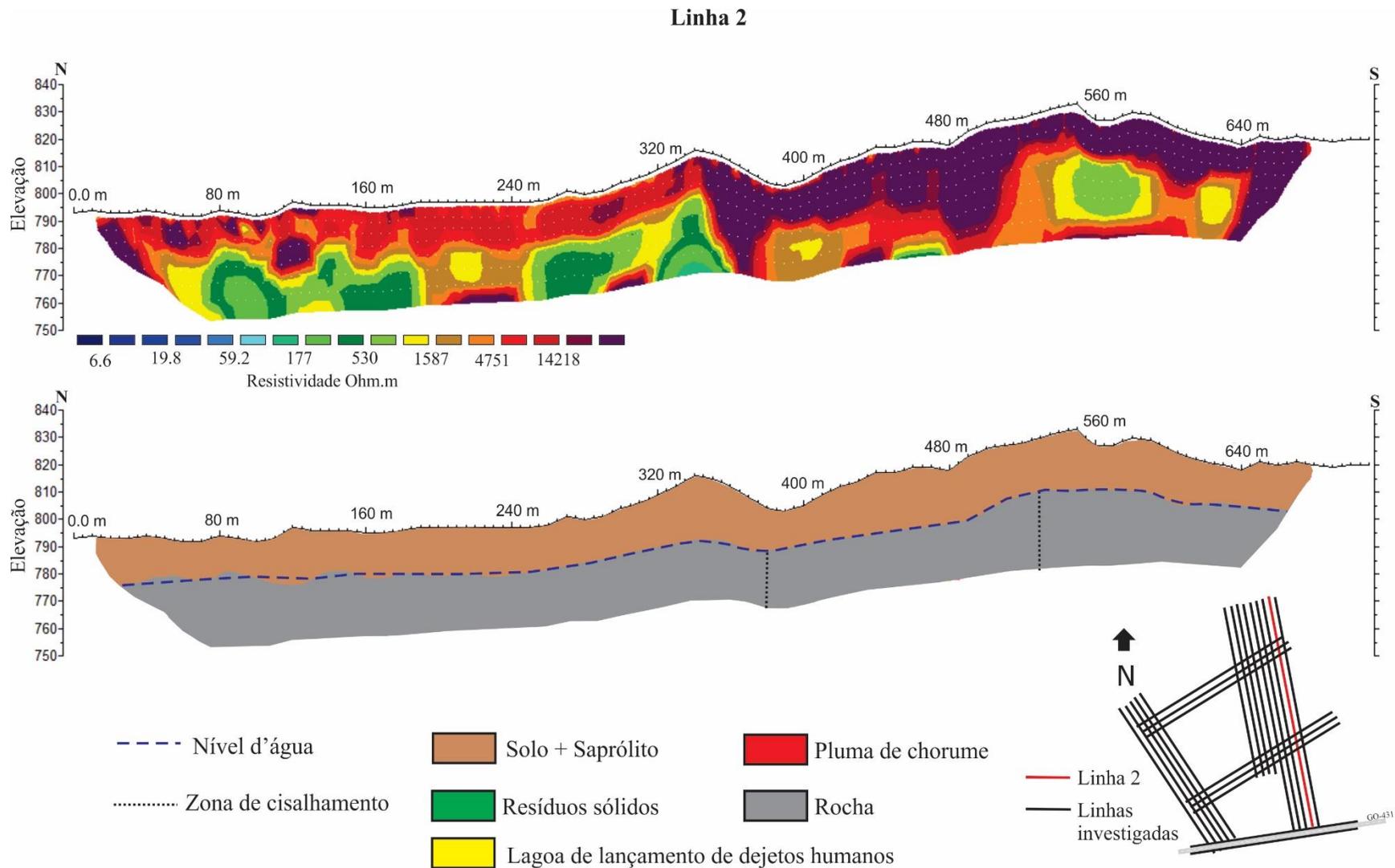
## 8 APÊNDICE

**Apêndice I – Seções de resistividade obtidos após a inversão e os respectivos modelos geológicos.**

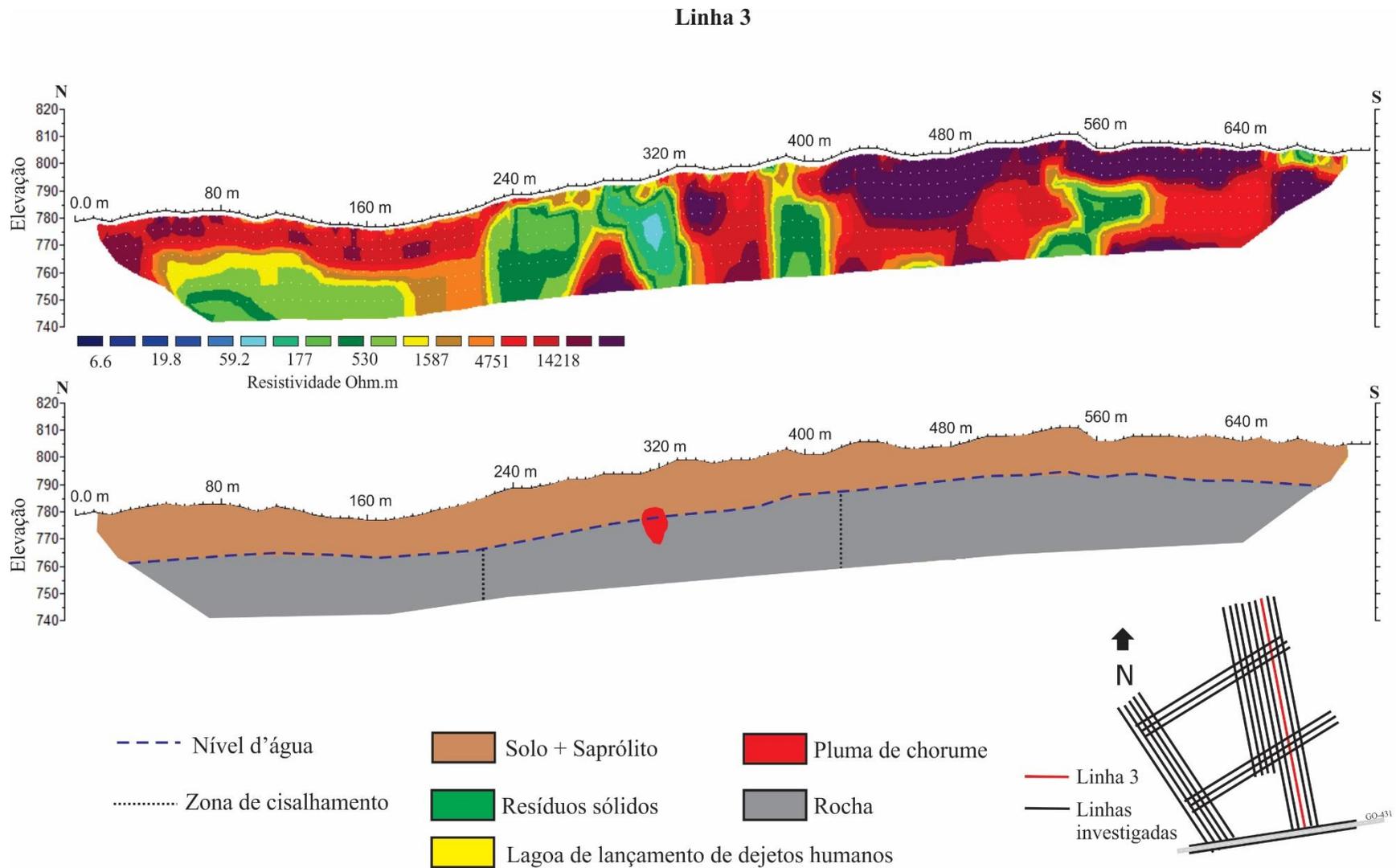
### Linha 1



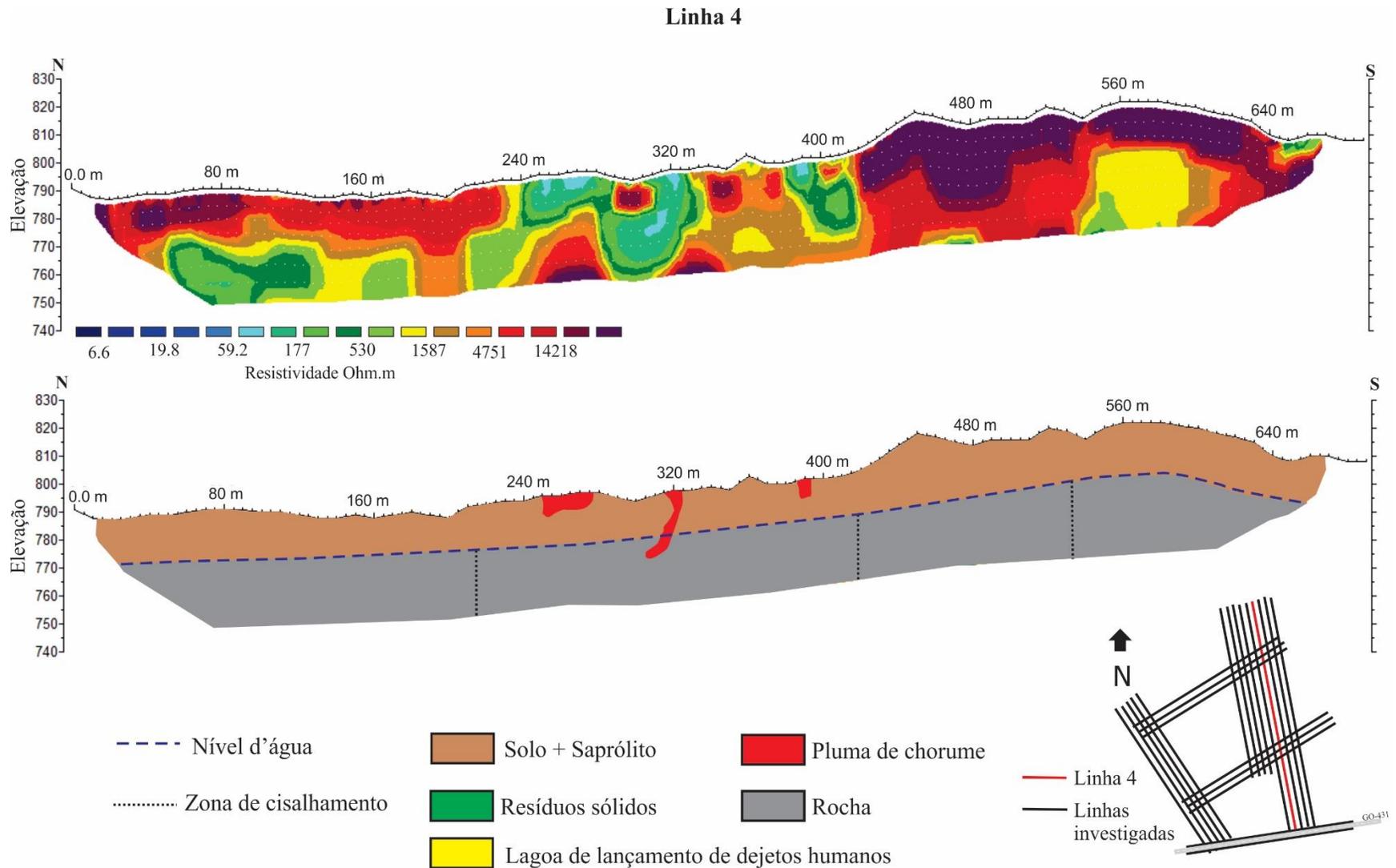
**A 1:** Modelo de resistividade eléctrica da linha L1 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade



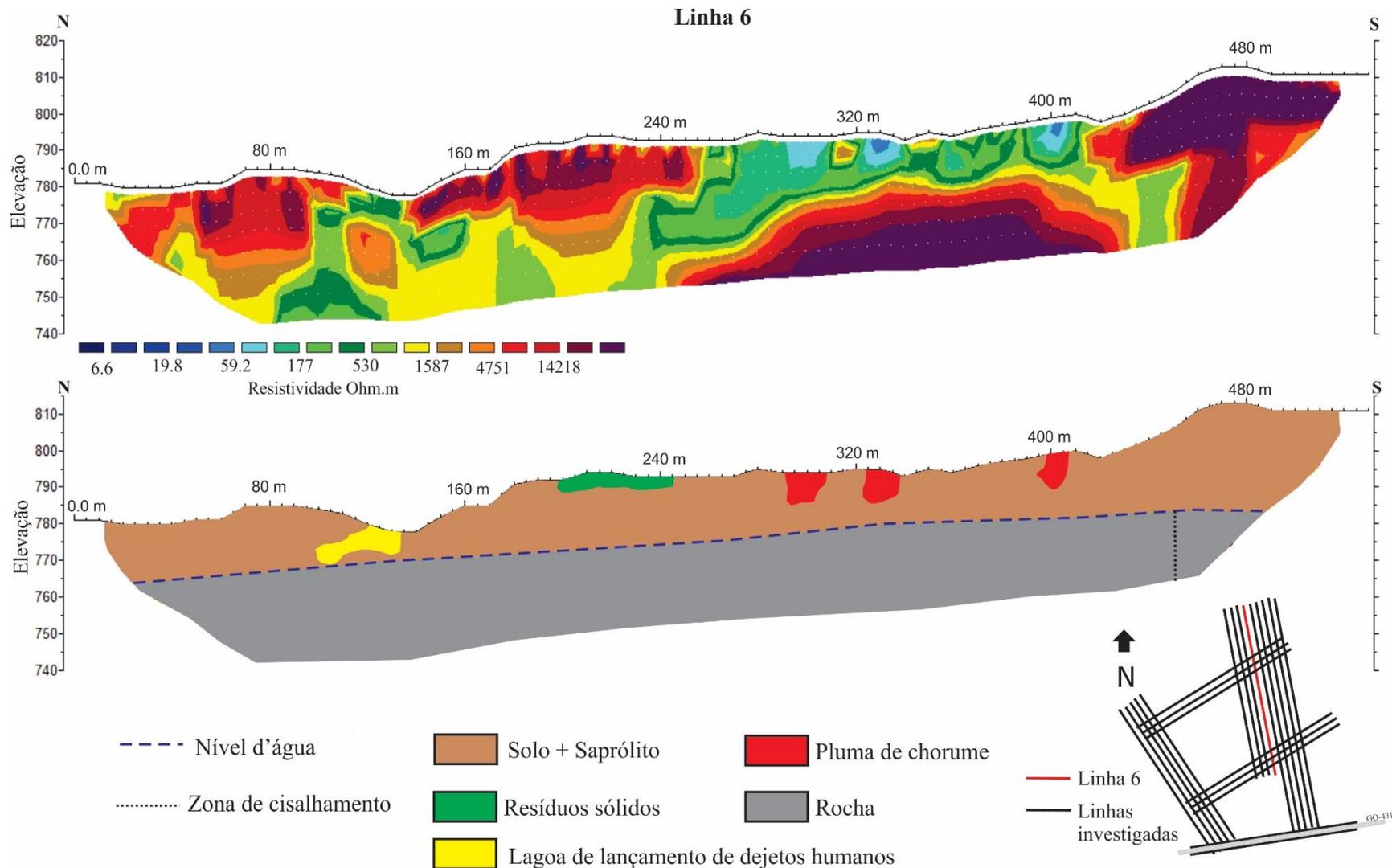
**A 2:** Modelo de resistividade elétrica da linha L2 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade



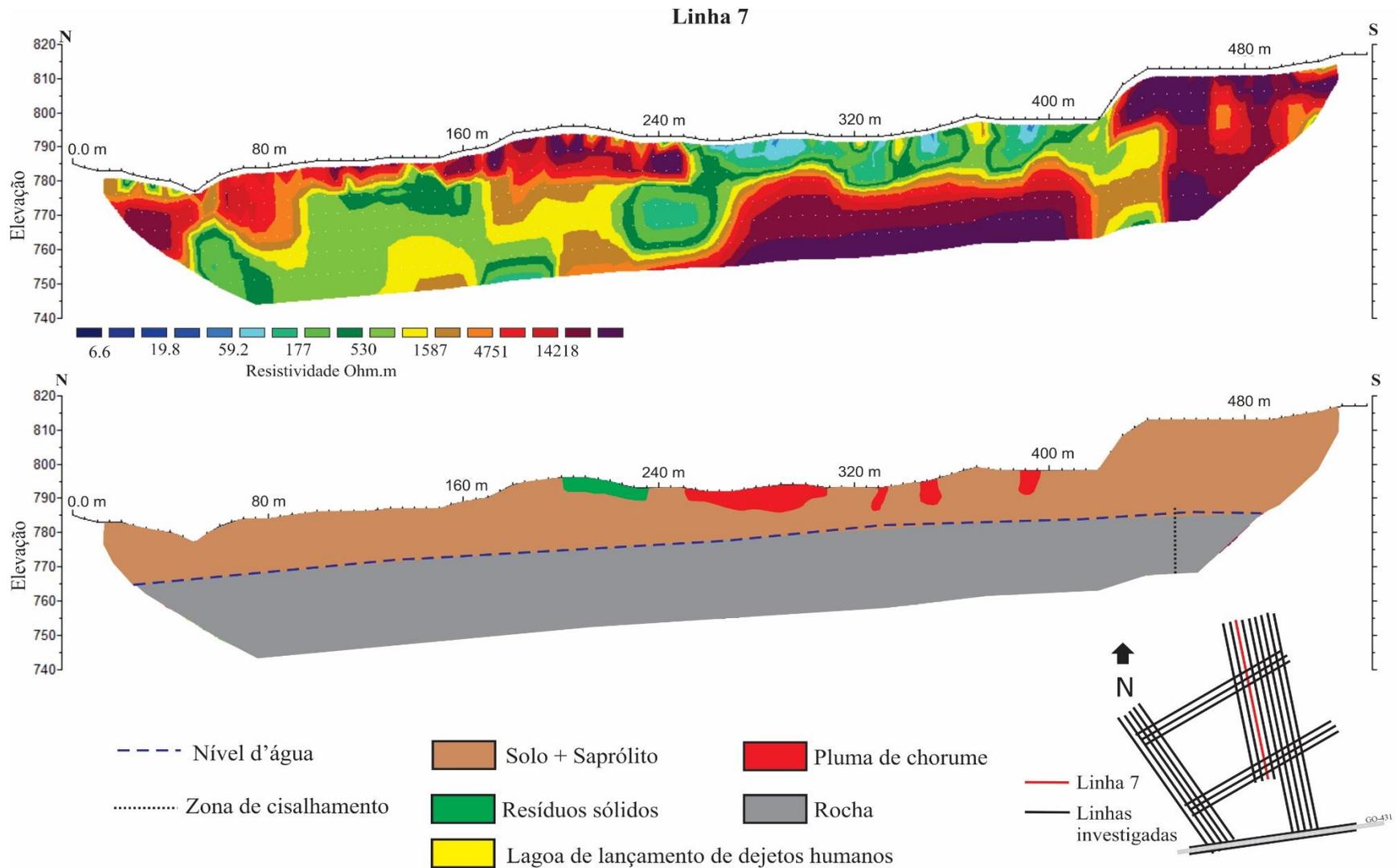
**A 3:** Modelo de resistividade elétrica da linha L3 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade



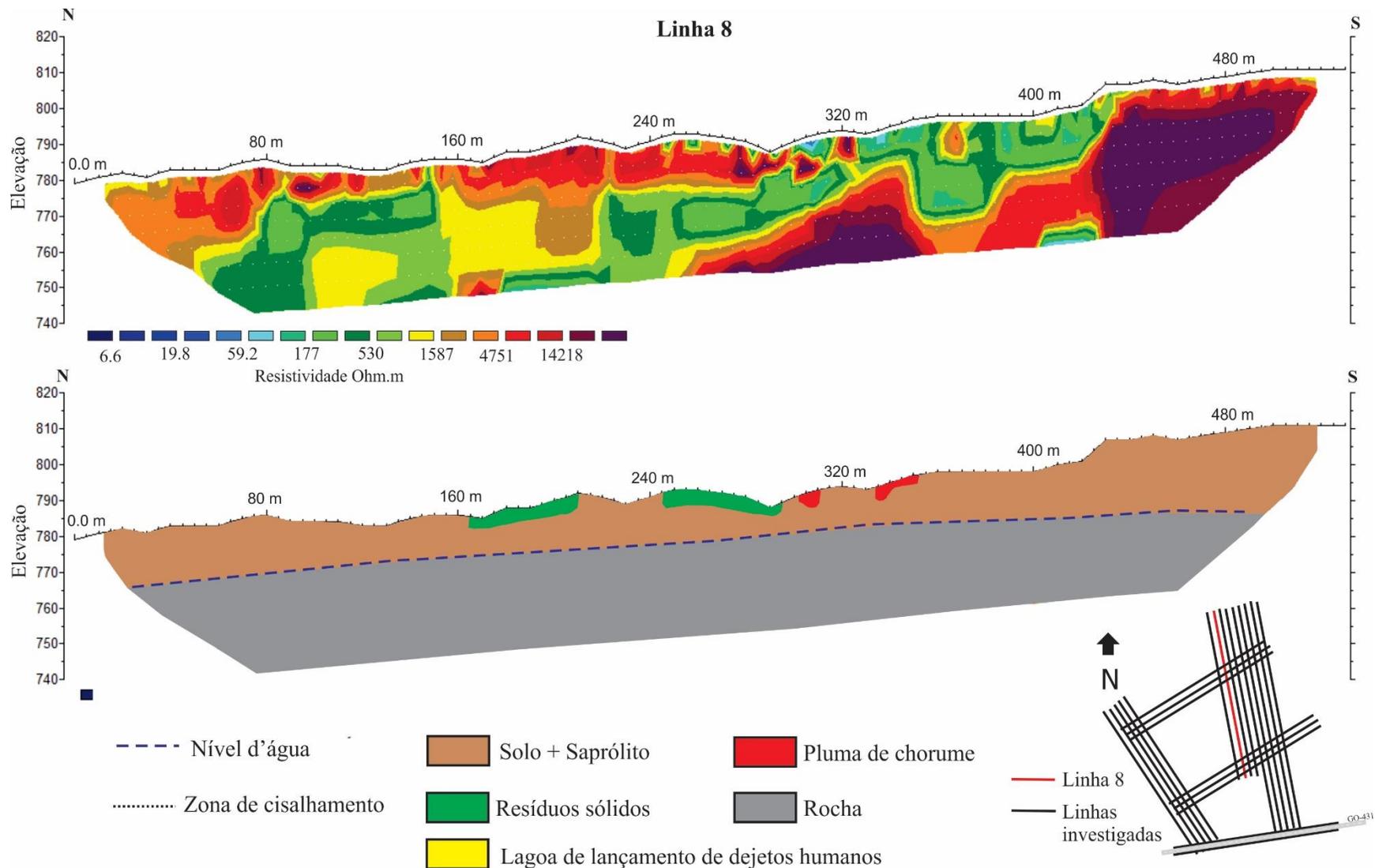
**A 4:** Modelo de resistividade elétrica da linha L4 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.



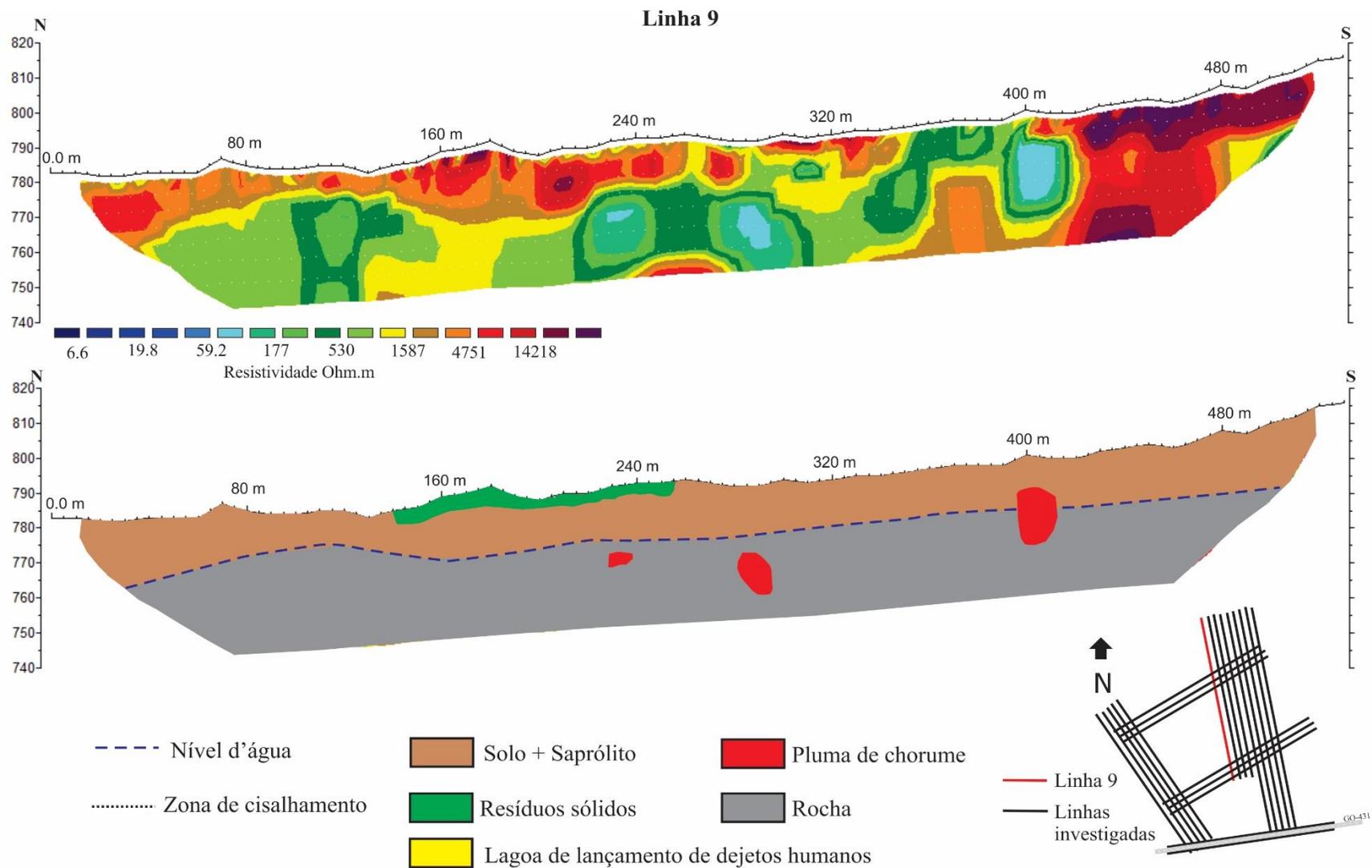
**A 5:** Modelo de resistividade elétrica da linha L6 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.



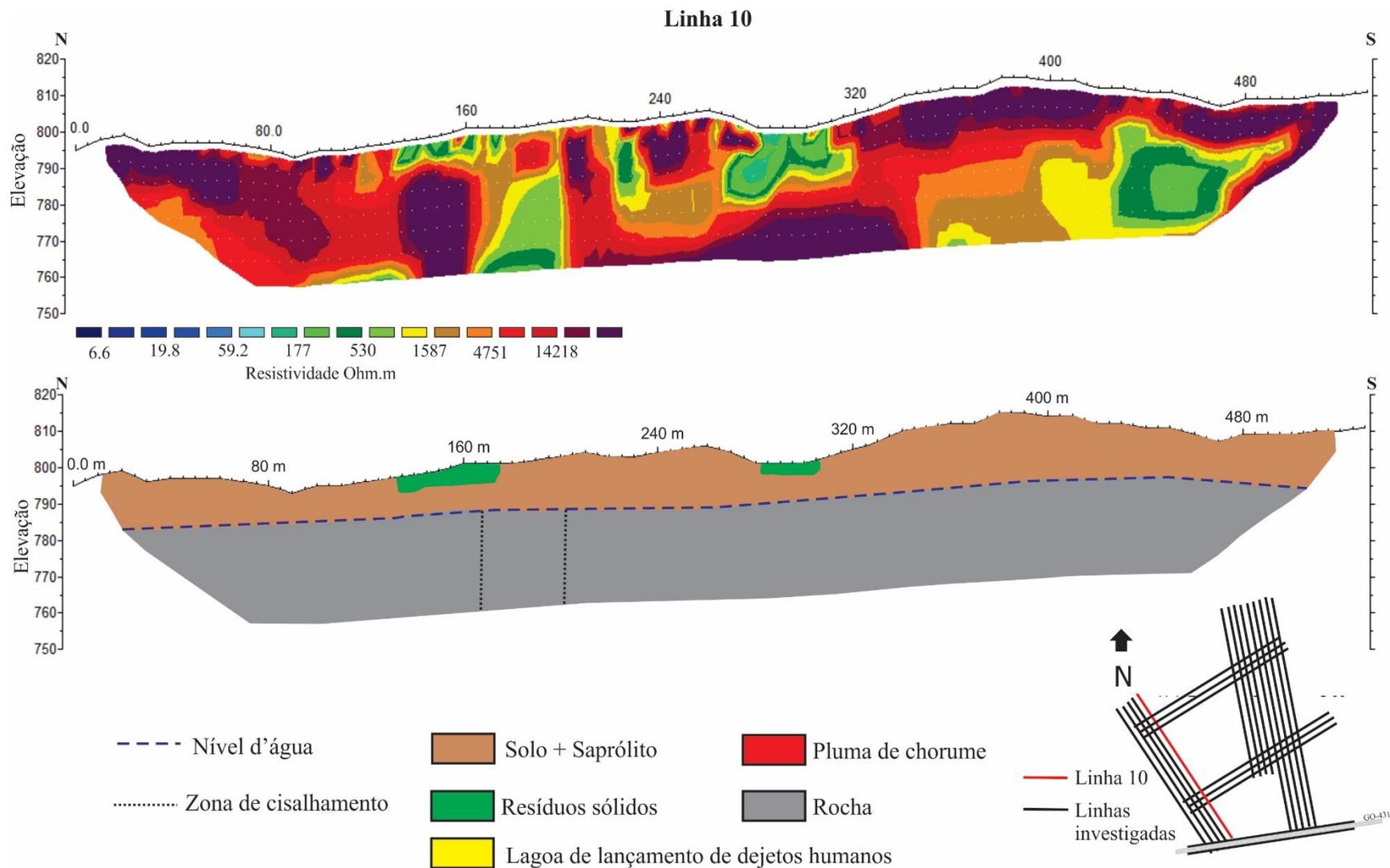
**A 6:** Modelo de resistividade elétrica da linha L7 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.



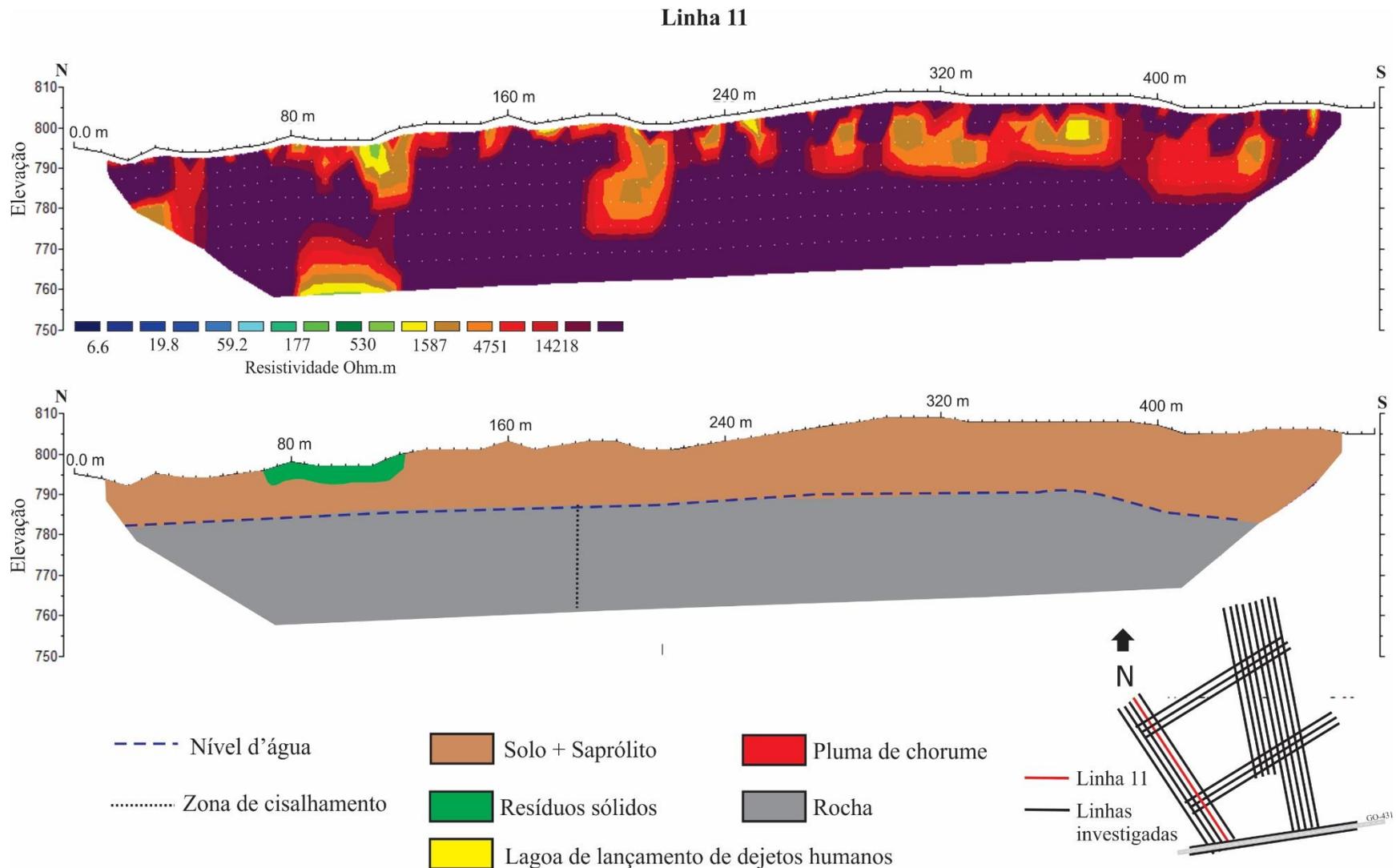
**A 7:** Modelo de resistividade elétrica da linha L8 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.



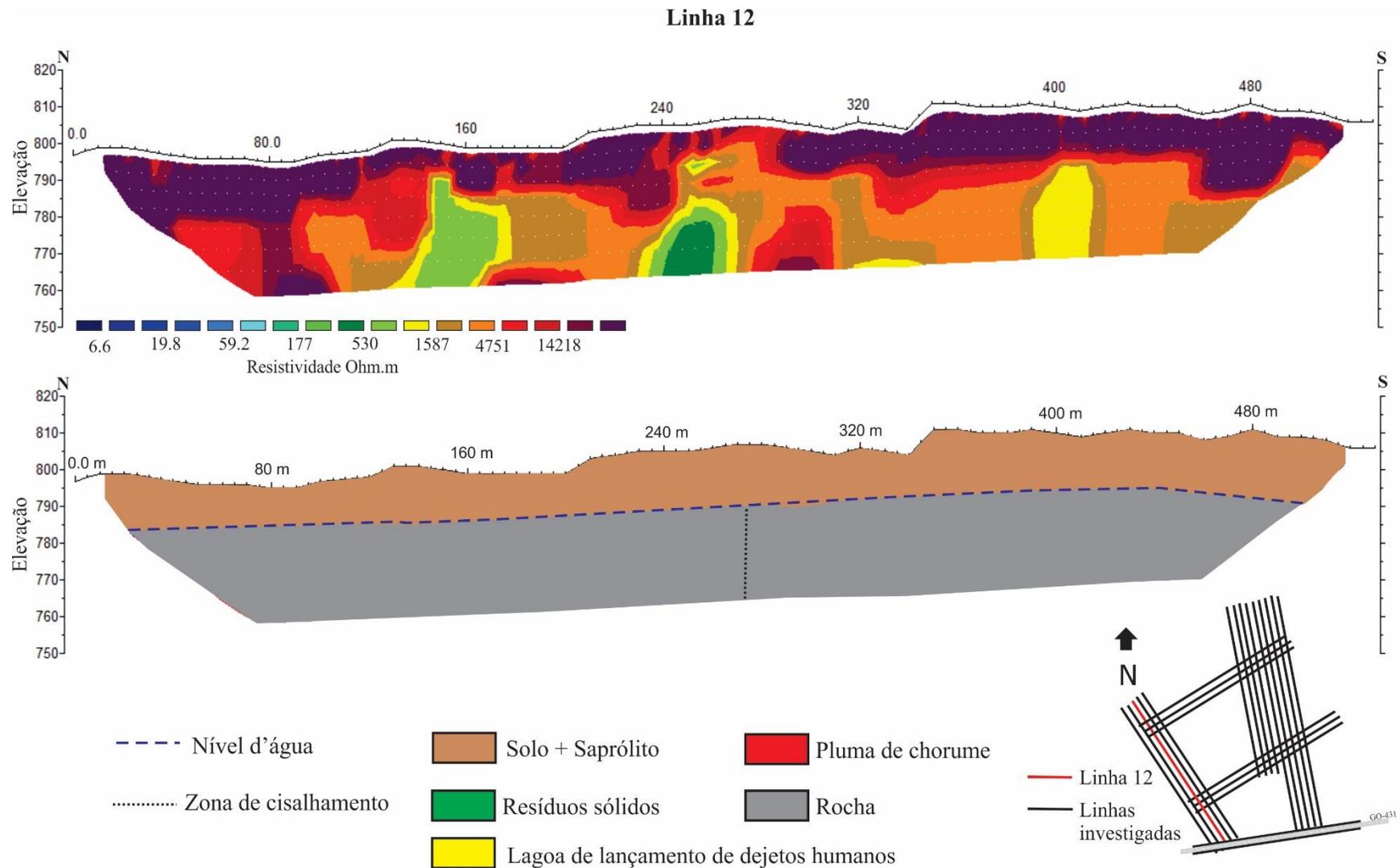
**A 8:** Modelo de resistividade elétrica da linha L9 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.



**A 9:** Modelo de resistividade eléctrica da linha L10 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.

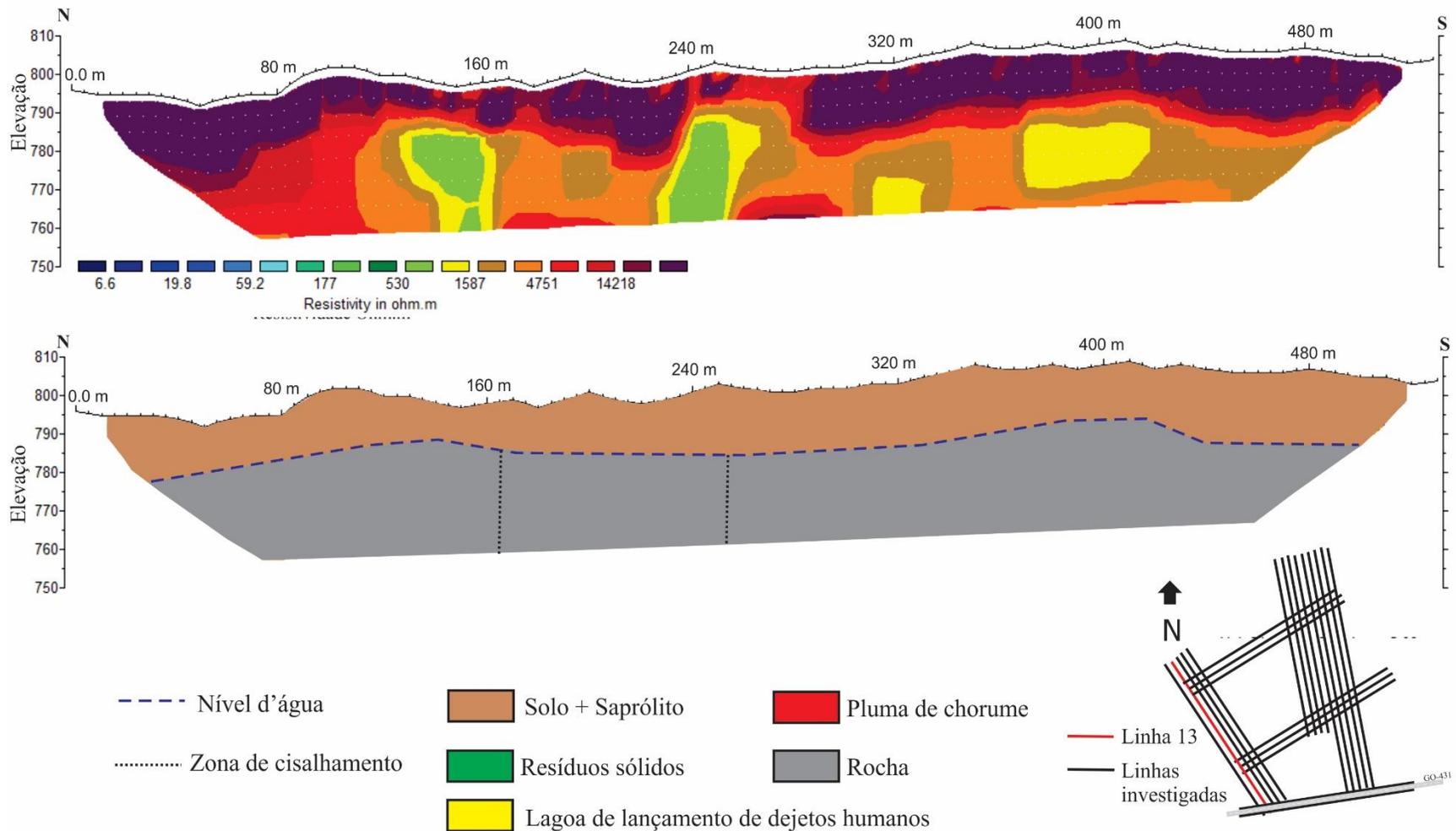


**A 10:** Modelo de resistividade elétrica da linha L11 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.



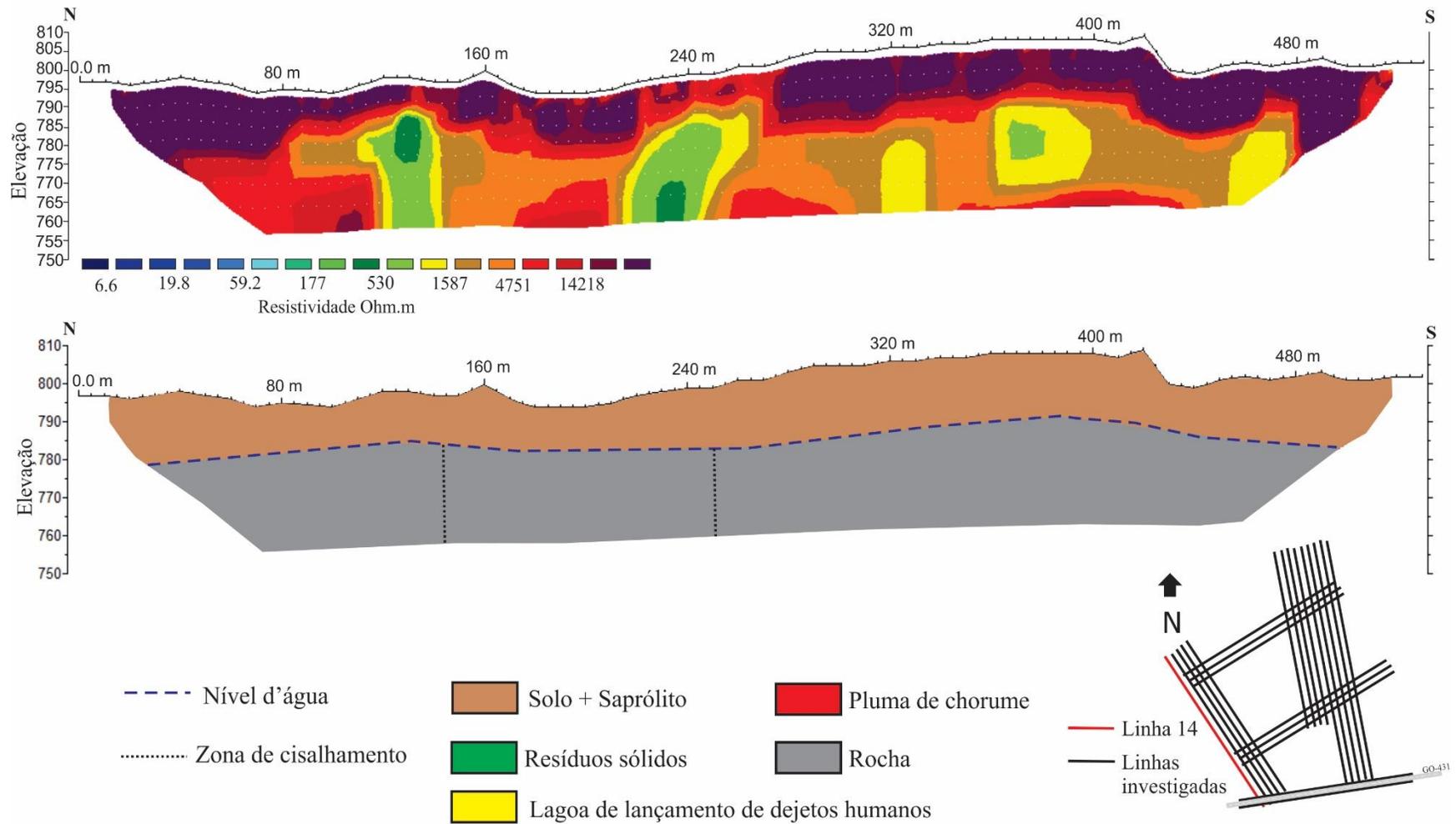
**A 11:** Modelo de resistividade elétrica da linha L12 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade

### Linha 13

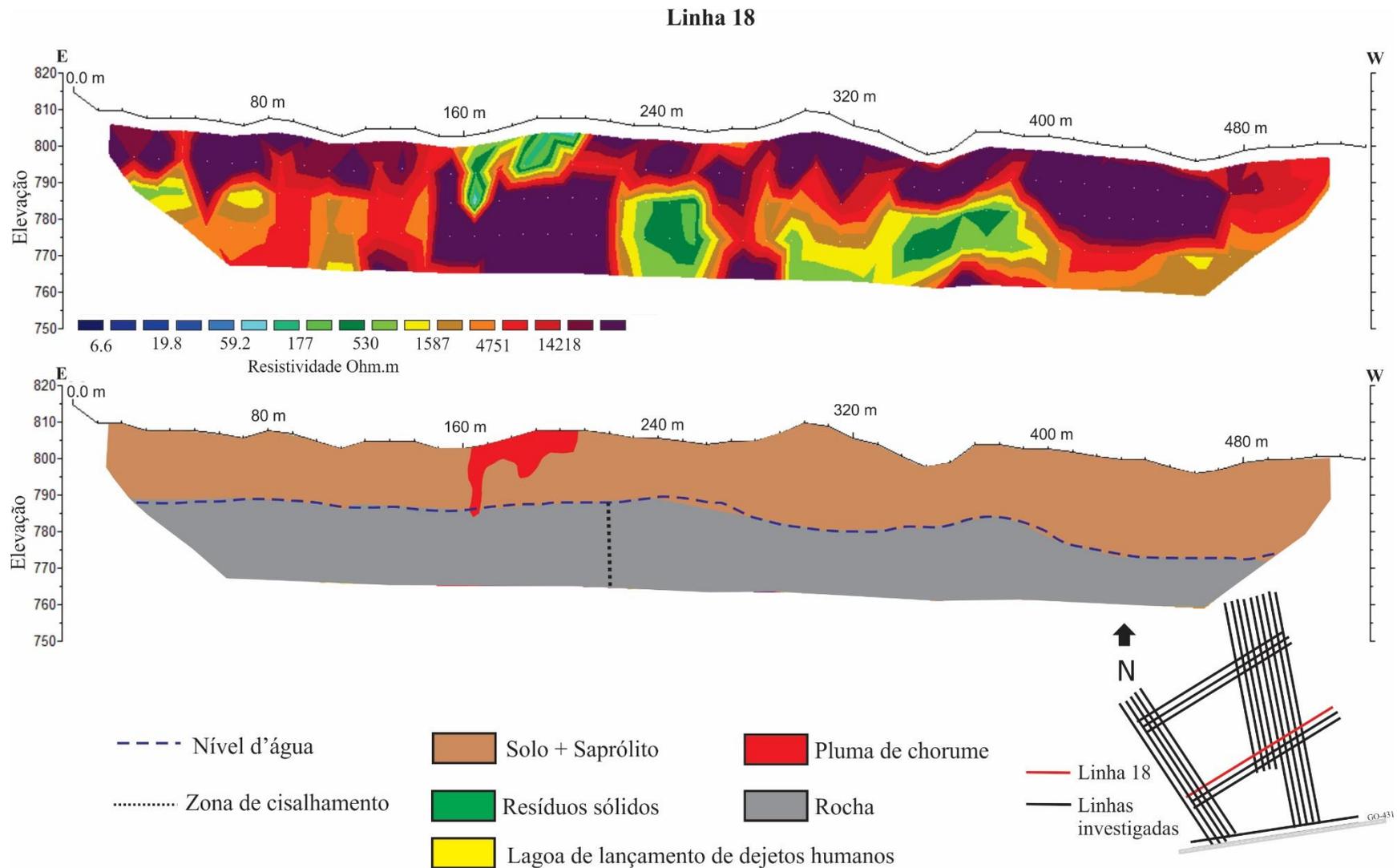


**A 12:** Modelo de resistividade elétrica da linha L13 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.

### Linha 14

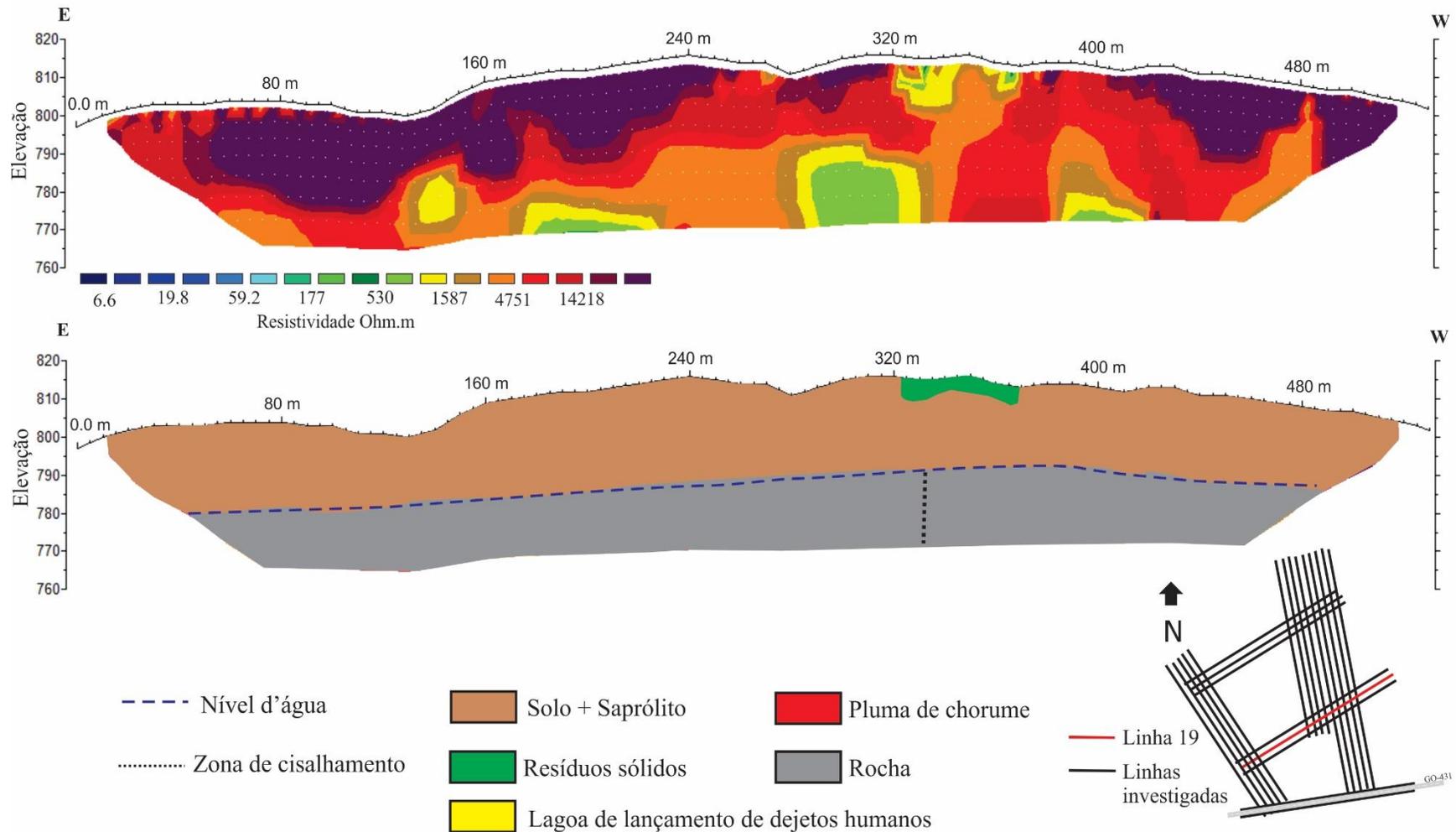


**A 13:** Modelo de resistividade elétrica da linha L14 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.



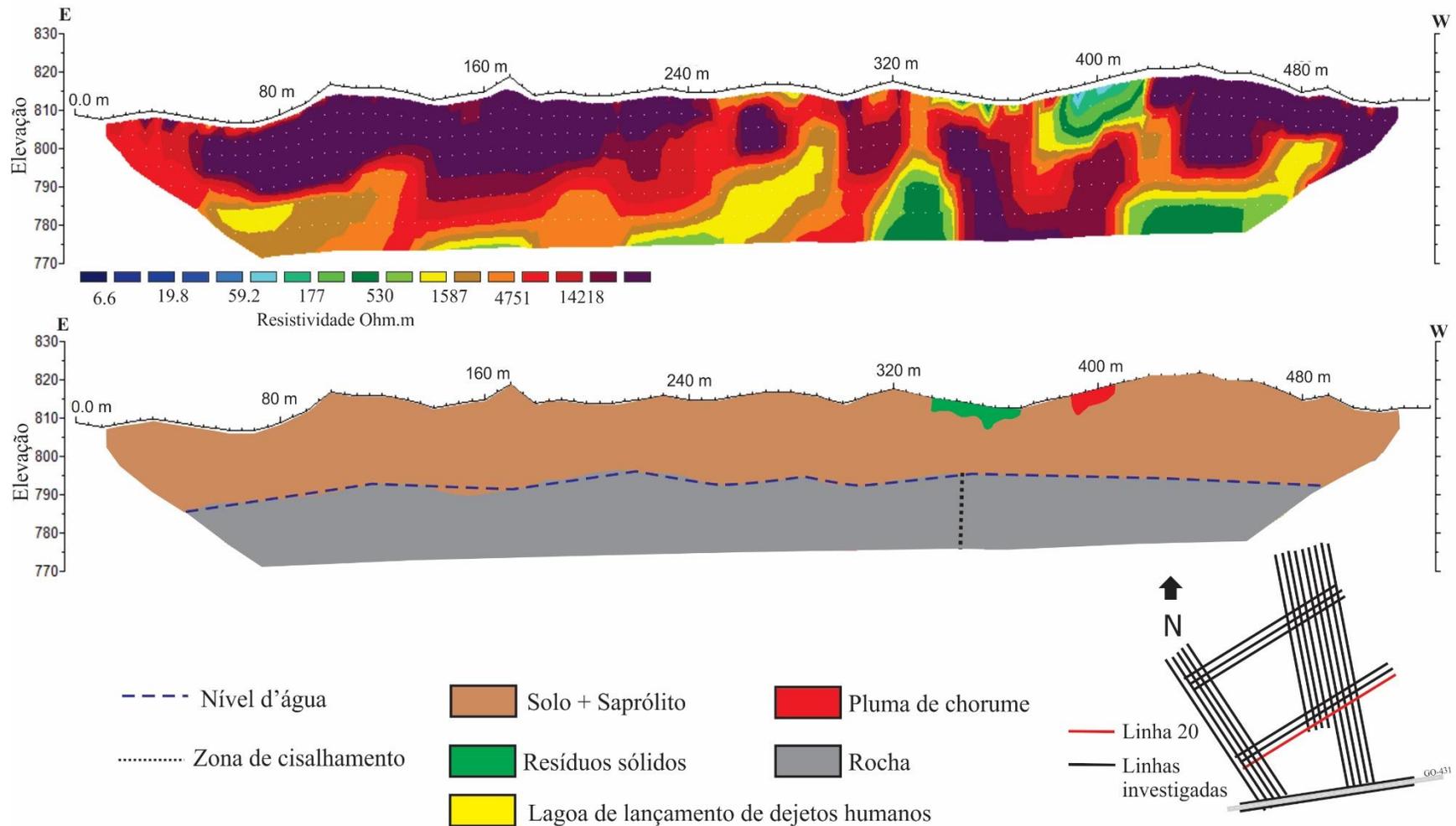
**A 14:** Modelo de resistividade elétrica da linha L18 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.

### Linha 19



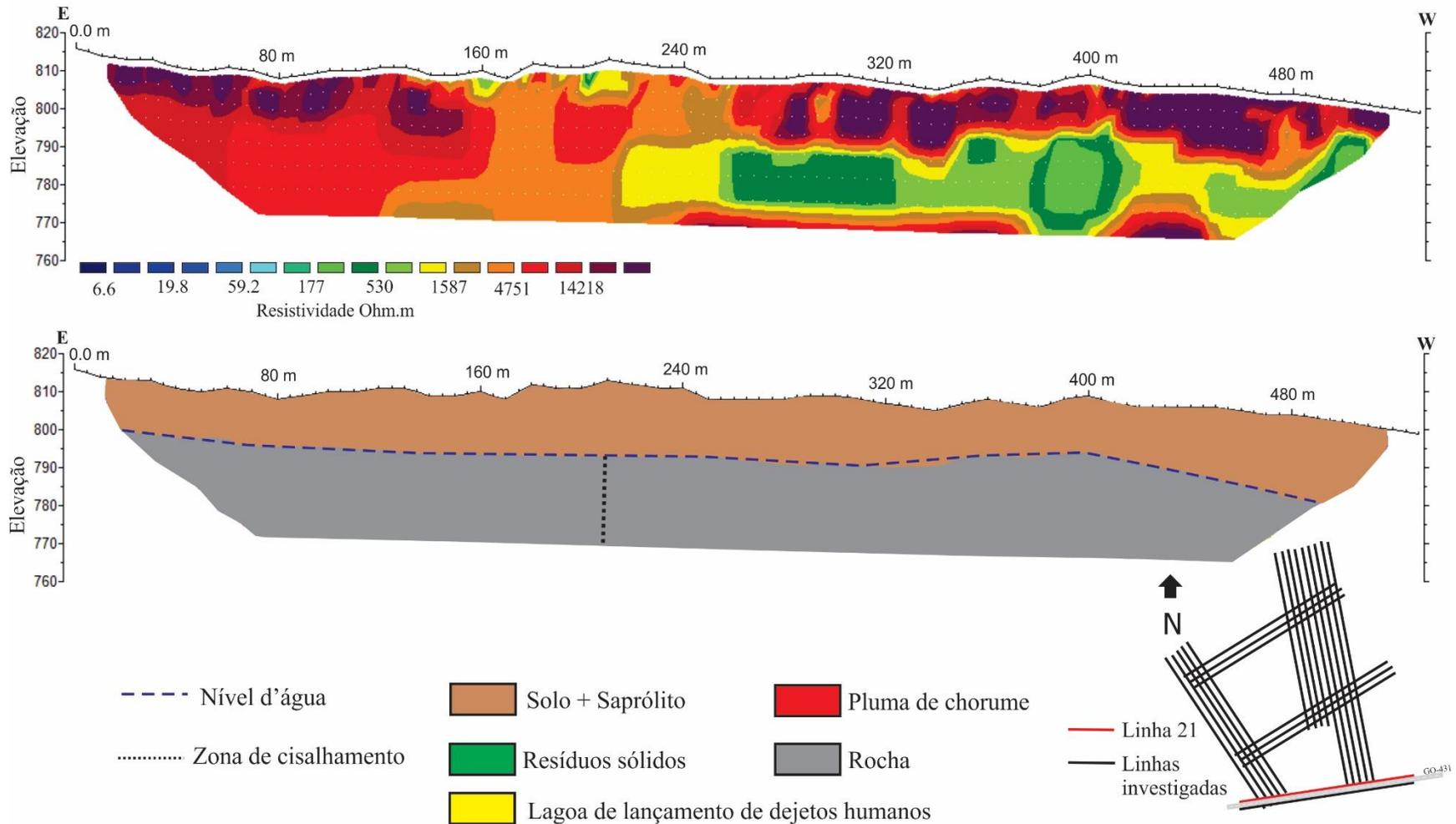
**A 15:** Modelo de resistividade elétrica da linha L19 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.

### Linha 20



**A 16:** Modelo de resistividade elétrica da linha L20 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.

### Linha 21



**A 17:** Modelo de resistividade elétrica da linha L21 obtido após a inversão no software Res2dInv com modelo geológico elaborado a partir da seção de resistividade.