

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARINA OLIVEIRA SILVEIRA

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NA VERIFICAÇÃO DE POTENCIAL DE
CONTAMINAÇÃO POR RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO LIXÃO DE ALTO
PARAÍSO DE GOIÁS-GO**

LONDRINA

2022

MARINA OLIVEIRA SILVEIRA

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NA VERIFICAÇÃO DO POTENCIAL
DE CONTAMINAÇÃO POR RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO LIXÃO DE
ALTO PARAÍSO DE GOIÁS-GO**

**Application of geophysical methods in Verification of potential solid urban
waste contamination in Alto Paraíso de Goiás-GO dump**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Maurício Moreira dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciam as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARINA OLIVEIRA SILVEIRA

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NA VERIFICAÇÃO DE POTENCIAL DE
CONTAMINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO LIXÃO DE ALTO
PARAÍSO DE GOIÁS-GO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 09/12/2022

Ajadir Fazolo
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina

Rigoberto Lazaro Prieto Cainzos
Doutor
Centro Universitário Filadélfia

Mauricio Moreira Dos Santos
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina

LONDRINA

2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço imensamente a minha família, meus pais Susana Fátima de Oliveira Silveira e Marino dos Santos Silveira (in memoriam) e a minha irmã Aline Oliveira Silveira por sempre se esforçarem e me ajudarem para que eu pudesse hoje estar finalizando meu curso de graduação, pelo apoio e amor que me fizeram seguir e permanecer nesta caminhada rumo ao meu diploma.

Agradeço a minha namorada Alana Salomoni Pastorio, pelo apoio nas horas difíceis e pelo carinho que teve comigo nesses semestres de graduação. Assim como aos meus amigos que caminharam ao meu lado durante todos esses anos, por me proporcionarem momentos de alegria, diversão, amizade, união e autoconhecimento, vocês foram os motivos das minhas alegrias e me ajudaram para que tudo fosse possível.

Ao prof. e coorientador Welitom Rodrigues Borges por todas as sugestões, apoio e incentivo na realização deste trabalho e meu querido professor e orientador Maurício dos Santos por caminhar e participar da conclusão deste ciclo de minha graduação.

RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos, que são destinados a lixões e aterros irregulares, ocasionam impactos ambientais e problemas de saúde pública devido sua má gestão, que acarreta a percolação de chorume no solo e podendo atingir águas subterrâneas. Os métodos geofísicos, por serem não-invasivos e ágeis, se destacam na investigação de áreas contaminadas em subsuperfície, considerando o solo e as águas subterrâneas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho, foi realizar investigações na identificação de anomalias geofísicas na área do Lixão de Alto do Paraíso de Goiás-GO, que se localiza no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, avaliando potencial de contaminação dos solos e águas subterrâneas por plumas de origem da decomposição de resíduos sólidos urbanos. Para esse fim, foram coletados dados do meio físico a partir da aplicação integrada dos métodos geofísicos *Ground Penetrating Radar* ou radar de penetração no solo e Eletrorresistividade. Os resultados do radar de penetração no solo, obtidos com as antenas não blindadas de 80 MHz (com a técnica da sondagem de velocidade do tipo ponto médio comum) e com as antenas blindadas de 200 MHz (com a técnica do perfil de afastamento comum), possibilitaram a localização de prováveis áreas de percolação de chorume no interior da área do aterro irregular. Para os dados coletados aplicando-se Eletrorresistividade, foi utilizado o SYSCAL-PRO, empregando a técnica do caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo, sendo encontradas anomalias de Eletrorresistividade indicando possíveis plumas de contaminação nas laterais da face sul e leste do entorno do lixão, que é corroborada pela hipsometria da região de localização do aterro irregular, que indica que o fluxo de escoamento se dá no sentido Nordeste para Sudeste. Correlacionando os dados obtidos pelo GPR e da Eletrorresistividade foi possível obter uma maior veracidade para os resultados. Contudo, para constatação afirmativa de contaminação seria necessário a utilização de métodos invasivos, como a perfuração de sondagens e instalação de poços de monitoramento permitindo a coleta de amostras de solos e água, assim ficando como sugestão para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Lixão Alto do Paraíso de Goiás; GPR; Eletrorresistividade; Contaminação por chorume.

ABSTRACT

Urban solid waste, which is sent to dumps and irregular landfills, causes environmental impacts and public health problems due to poor management, which leads to leachate percolation in the soil and may reach groundwater. Geophysical methods, being non-invasive and agile, stand out in the investigation of subsurface contaminated areas, considering soil and groundwater. Thus, the objective of this work was to carry out investigations in the identification of geophysical anomalies in the area of the Dump of Alto do Paraíso de Goiás-GO, which is located in the Chapada dos Veadeiros National Park, evaluating potential contamination of soils and groundwater by plumes from the decomposition of urban solid waste. For this purpose, data from the physical environment were collected from the integrated application of the Ground Penetrating Radar and Electroresistivity geophysical methods. Ground penetrating radar results obtained with the 80 MHz unshielded antennas (with the common midpoint velocity sounding technique) and with the 200 MHz shielded antennas (with the common pitch profile technique) , enabled the location of probable leachate percolation areas inside the irregular landfill area. For the data collected by applying Electroresistivity, SYSCAL-PRO was used, using the electric path technique with the dipole-dipole arrangement, and Electroresistivity anomalies were found indicating possible contamination plumes on the sides of the south and east face of the landfill surroundings , which is corroborated by the hypsometry of the region where the irregular embankment is located, which indicates that the outflow flows from the Northeast to the Southeast. Correlating the data obtained by GPR and Electroresistivity it was possible to obtain a greater veracity for the results. However, for affirmative verification of contamination, it would be necessary to use invasive methods, such as drilling boreholes and installing monitoring wells allowing the collection of soil and water samples, thus remaining as a suggestion for future work.

Keywords: Alto do Paraíso de Goiás Dumps; GPR; Resistivity; Contamination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de um aterro irregular.....	19
Figura 2 - Imagem de satélite do Lixão do município de Alto Paraíso de Goiás-GO.....	27
Figura 3 - Mapa hipsométrico do município de Alto Paraíso de Goiás-GO, destacando a localização do Lixão de Alto Paraíso de Goiás em um retângulo vermelho.....	28
Figura 4 - Fotografias evidenciam a aquisição de dados de GPR na área do Lixão de Alto Paraíso de Goiás. (A) unidade de controle do GPR SIR3000 e as antenas não blindadas de 80 MHz que foram usadas na aquisição de dados do tipo CMP. (B) registro da aquisição de dados do tipo CMP. (C) e (D) registros da aquisição de dados GPR no modo common offset.....	31
Figura 5 -Esquema com a localização e o sentido adotado para aquisição dos dados de GPR na área interna e externa do Lixão de Alto Paraíso de Goiás.....	32
Figura 6 - Disposição dos eletrodos no arranjo Dipolo-dipolo.....	34
Figura 7 - Esquema com a localização e o sentido adotado para aquisição dos dados de Eletrorresistividade na área interna e externa do Lixão de Alto Paraíso de Goiás.....	34
Figura 8 - Padrões de reflexão encontrados no Lixão de Alto Paraíso de Goiás. (A) Padrão sem reflexão do sinal, RFF. (B) Padrões de refletores planos, oblíquos e descontínuos de alta amplitude, DPROD. (C) Padrões de refletores convexos, caóticos e descontínuos e de baixa amplitude, CRCD. (D) Padrões de refletores caóticos com alta amplitude e associados a um contato descontínuo com refletores CRCD, SROD.....	37
Figura 9 - Perfil de GPR na linha 1 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	38
Figura 10 - Perfil de GPR na linha 2 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	39
Figura 11 - Perfil de GPR na linha 3 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	40
Figura 12 - Perfil de GPR na linha 4 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	41
Figura 13 - Perfil de GPR na linha 5 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	41
Figura 14 - Perfil de GPR na linha 6 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	42
Figura 15 - Perfil de GPR na linha 7 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	42
Figura 16 - Perfil de GPR na linha 8 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	43
Figura 17 - Perfil de GPR, na linha 9 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	44
Figura 18 - Perfil de GPR na linha 10 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	45
Figura 19 - Perfil de GPR na linha 11 com a delimitação dos padrões de reflexão.....	46

Figura 20 - Mapa de localização dos perfis de GPR, apontando os perfis sem potencial contaminação e os perfis com potencial contaminação.....	47
Figura 21 - Seção de Eletrorresistividade na linha 1.....	48
Figura 22 - Seção de Eletrorresistividade e interpretação na linha 2.....	50
Figura 23 - Seção de Eletrorresistividade e interpretação na linha 3.....	51
Figura 24 - Seção de Eletrorresistividade e interpretação na linha 4.....	53
Figura 25 - Seção de Eletrorresistividade e interpretação na linha 5.....	54
Figura 26 - Seção de Eletrorresistividade e interpretação na linha 6.....	55
Figura 27 - Mapa de localização das seções de Eletrorresistividade, apontando as seções sem potencial contaminação e as seções com potencial contaminação.....	56
Figura 28 - Seção de Eletrorresistividade na linha 5 sobreposta ao perfil da linha 8 de GPR, evidenciando a detecção da possível contaminação no mesmo local.....	58
Figura 29 - Seção de Eletrorresistividade na linha 5 sobreposta ao perfil da linha 8 de GPR, evidenciando a detecção da possível contaminação no mesmo local.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições típicas do lixiviado encontrado em aterros novos e maduros.....	18
---	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMP	<i>Common Mid Point</i>
DDP	Diferença de potencial
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil
RSU	Resíduo Sólido Urbano

LISTA DE SÍMBOLOS

I	Corrente elétrica
ΔV	Diferença de potencial
K	Fator de espaçamento
ρ	Resistividade
ρ_a	Resistividade aparente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 O descarte de RSU e a contaminação	17
3.2 Dados e Políticas Públicas	20
3.3 Métodos geofísicos na engenharia ambiental	21
3.3.1 Estudos de referência	22
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Caracterização do local de estudo	26
4.2 Ground Penetrating Radar – GPR	29
4.2.1 Metodologia aplicada para o GPR	30
4.3 Eletroresistividade	32
4.3.1 Metodologia aplicada para a Eletroresistividade	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1 Ground Penetrating Radar – GPR	36
5.2 Eletroresistividade	47
5.3 Análise correlacionando os dados de GPR e Eletroresistividade	56
6 CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Lei nº 12.305/10, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) os resíduos sólidos são resultantes do descarte da ação humana em sociedade, podendo ser material, substância, objeto ou bem, que tem sua destinação final no estado sólido ou semissólido, considerando também gases armazenados em recipientes e líquidos que devido a suas características não podem ser descartados na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou necessitem de soluções técnicas ou economicamente inviáveis. Por si só, o aumento do volume de resíduos sólidos urbanos já ocasiona problemas ambientais, contudo o risco de contaminação aumenta de maneira relevante quando o descarte e/ou processamento e tratamento destes materiais não é feito de maneira adequada (CAVALCANTI *et al.*, 2014). Dentre os males causados pelo aumento do volume de resíduos sólidos urbanos, e pelo descarte, tratamento e processamento destes materiais feito de maneira inadequada, estão doenças infecciosas (causadas por insetos, pássaros, ratos, gatos e cães) e a contaminação atmosféricas, de forma que são liberados gases tóxicos, como o metano e o dióxido de carbono, contaminando plantas e animais (BORGES *et al.*, 2022).

Além disso, o líquido resultante da decomposição da matéria orgânica forma o chorume, que devido à alta concentração de nutrientes podem contaminar o solo e as águas subterrâneas (CAVALCANTI *et al.*, 2014; BORGES *et al.*, 2022).

Esta contaminação é, em suma, provocada pela lixiviação, processo que ocorre devido a água presente nos resíduos somada a precipitação. Devido ao alto teor de matéria orgânica presente nos resíduos os processos biogeoquímicos são potencializados, fato que acarreta na aceleração da produção de gases, como metano, dióxido de carbono e amônia, e a lixiviação de metais pesados encontrados nos resíduos (VODYANITSKII, 2016).

Portanto, a área de descarte dos resíduos requer uma investigação e observação detalhada, para que assim os impactos perigosos dos aterros irregulares sejam diminuídos.

Contudo, o que ocorre no Brasil, país em desenvolvimento e que abriga aproximadamente 3.000 lixões ou aterros irregulares, sendo em sua maioria localizados em pequenos municípios com pouca ou nenhuma verba destinada à gestão de resíduos sólidos (ABRELPE, 2019). Em consequência, há uma falta de

planejamento, não respeitando critérios geotécnicos para a seleção do local ou qualquer projeto, com a função de evitar a percolação de lixiviado no subsolo, empregando geomembrana ou outro material impermeável, o que impacta diretamente na qualidade do solo da região e na contaminação das águas, conforme apontam Borges *et al.* (2022).

Nesse sentido, o Lixão do município do Alto Paraíso de Goiás-GO, é um exemplo negativo no que tange a falta de gestão na disposição final de resíduos sólidos urbanos, conforme aponta Borges *et al.* (2022, p. 3), pois foi “construído em cima de neossolo quartzarênico de granulação grossa com parâmetros hidrodinâmicos elevados, como porosidade e permeabilidade”, essa condição permite que o lixiviado percorra mais rapidamente as camadas intergranulares do solo, com grande potencial de contaminação das águas subterrâneas. Surge, portanto, necessidade de investigação maior das condições do meio subterrâneo deste local, avaliando o impacto ambiental a partir das técnicas adequadas de caracterização.

Segundo a NBR 15.935 (ABNT, 2011), que aborda a Aplicação de Métodos Geofísicos em Investigações ambientais e determina as diretrizes para a escolha de métodos geofísicos aplicáveis para a investigação de solo e água subterrânea, são recomendados a aplicação dos métodos de Eletorresistividade, Métodos eletromagnéticos, Potencial espontâneo, Polarização induzida e *Ground Penetrating Radar* (GPR), com a finalidade de delimitação de zonas de contaminação por lixiviado. O GPR é utilizado para investigações mais rasas, o termo raso é genérico, uma vez que a profundidade da investigação do GPR depende das propriedades elétricas do meio, condutividade elétrica e permissividade dielétrica (BORGES *et al.*, 2022).

Sendo assim, o presente trabalho objetivou a realização de um estudo geofísico no entorno do Lixão do município de Alto Paraíso de Goiás-GO a partir da aplicação de *Ground Penetrating Radar* e Eletorresistividade, para verificação de potencial contaminação da área utilizada para disposição final de resíduos sólidos urbanos.

A aplicação de métodos geofísicos é de grande importância para este tipo de estudo ambiental, especialmente em terrenos no entorno de aterros irregulares, pois são considerados eficientes no que tange a rapidez e o baixo custo com que as informações são coletadas (SHIRAIWA *et al.*, 2002). Contudo, é importante ressaltar que o sucesso nas pesquisas depende das características físicas do resíduo, bem

como o tipo de contaminante, da concentração do mesmo e das características hidrogeológicas do local de estudo, conforme apontam Borges et al. (2022).

Para que este objetivo fosse atingido, foram efetuadas visitas técnicas no local de estudo, em seguida aplicou-se a metodologia GPR e Eletroresistividade como ferramentas geofísicas para a verificação de evidências de contaminação subterrânea. Para a obtenção desses dados foram mapeadas as linhas, nas laterais internas e externas do aterro irregular, onde foram empregados os equipamentos geofísicos. Por fim, para identificação de zonas anômalas geofísicas resultantes da migração de chorume proveniente da degradação de matéria orgânica no entorno do aterro irregular, o tratamento dos dados obtidos buscou avaliar a atenuação de sinal para o GPR, e baixas resistividades para a Eletroresistividade.

Cabe destacar, este estudo é de suma importância para a sociedade e para a comunidade acadêmica, visto que a cidade de Alto Paraíso de Goiás - GO é a principal cidade do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, maior parque brasileiro na região centro-oeste, que ainda dispõe de resíduos sólidos a céu aberto (aterro irregular, lixão), conforme apontam estudos de Borges et al. (2022). Nessa região ocorre o encontro das bacias hidrográficas do Rio Tocantins-Araguaia e do Rio São Francisco, outro fato que atrai a atenção para a necessidade da investigação de potencial contaminação no Lixão do município de Alto Paraíso de Goiás-GO. Além do que esta situação está de desencontro com a Lei nº 12.305, sancionada em 2 de agosto de 2010, que proíbe a existência deste tipo de depósito (BRASIL,2010), de forma que atualmente é provável um alto grau de contaminação no solo e nas águas subterrâneas, devido à destinação errônea e o tratamento não adequado.

Além disto, o presente estudo visa unir-se a trabalhos já realizados com aplicação de métodos geofísicos para análise de contaminação do solo e água subterrânea, como é o caso dos autores Meju (2000), Elis e Zuquette (2002), Shiraiwa et al. (2002), Moura e Malagutti Filho (2003), Gallas et al. (2005), Laureano e Shiraiwa (2008), Alves (2018) e Borges et al. (2022), de forma que, assim como Zanon (2014) sugere, seja incentivada a execução de novos ensaios de estudo de contaminação do solo, para que seja possível compreender os mecanismos atuantes na contaminação, entendendo os níveis de adsorção dos constituintes e os efeitos dos mesmos ao longo do tempo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo geral a aplicação de métodos geofísicos para a busca de evidências de potencial contaminação do meio subterrâneo no entorno do Lixão de Alto Paraíso de Goiás pela percolação de chorume proveniente da degradação dos resíduos sólidos urbanos, que são depositadas de forma irregular nesse local.

2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar o método geofísico, GPR, para coleta de dados.
- Aplicar a Eletrorresistividade, método geofísico, para coleta de dados.
- Avaliar os dados coletados para investigação de potenciais plumas de contaminação.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O descarte de RSU e a contaminação

O Brasil, conforme apontam dados da ABRELPE (2021), descartava até 2021 cerca de 76 milhões de toneladas de RSU por ano, deste total, cerca de 39,8% são destinados de maneira inadequada. Estes dados variam de região para região, o que é caracterizado diretamente pelas condições sociais, econômicas e culturais de cada local do país.

As plumas de contaminação são geradas a partir do despejo de poluentes no meio ambiente através de práticas inadequadas de descarte de resíduos ou de forma accidental. Quando o poluente é descartado no solo, esse material penetra o solo de maneira progressiva, devido a ação da gravidade e da chuva, podendo em muitos casos atingir águas subterrâneas. No momento em que o contaminante atinge a água, esse é dissolvido e transportado, assim tomando a forma de pluma de contaminação (SOARES, 2019).

Os RSUs dispostos em aterro sanitário ou aterros irregulares ao sofrer o processo de decomposição anaeróbica, predominantemente, geram o chorume e gases. A decomposição dos resíduos produz compostos voláteis, os quais se dissolvem no lixiviado, antes de volatilizar, contribuindo para a contaminação das águas (DAVIS, MASTEN, 2016). Na Tabela 1 é mostrado as diversas composições químicas do lixiviado.

O processo de lixiviação, é descrito pela NBR 10.005 como o procedimento capaz de quantificar a transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas que compõem os resíduos sólidos, através da dissolução no meio extrator (ABNT, 2004b).

Tabela 1 - Composições típicas do lixiviado encontrado em aterros novos e maduros.

Constituinte	Valor (mg/L)		
	Aterro novo (menos de 2 anos)		Aterro maduro (mais de 10 anos)
	Intervalo	Valor típico	
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO ₅)	2.000-30.000	10.000	100-200
Carbono orgânico total (COT)	1.500-20.000	6.000	80-160
Demanda química de oxigênio (DQO)	3.000-60.000	18.000	100-500
Sólidos suspensos totais	200-2.000	500	100-400
Nitrogênio orgânico	10-800	200	80-120
Nitrogênio amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10
Fósforo orto	4-80	20	4-8
Alcalinidade em CaCO ₃	1.000-10.000	3.000	200-1.000
pH	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Dureza total em CaCO ₃	300-10.000	3.500	200-500
Cálcio	200-3.000	1.000	100-400
Magnésio	50-1.500	250	50-200
Potássio	200-1.000	300	50-400
Sódio	200-2.500	500	100-200
Cloro	200-3.000	500	100-400
Sulfato	50-1.000	300	20-50
Ferro total	50-1.200	60	20-200

Fonte: TCHOBANOGLOUS, G. & KREITH (2002).

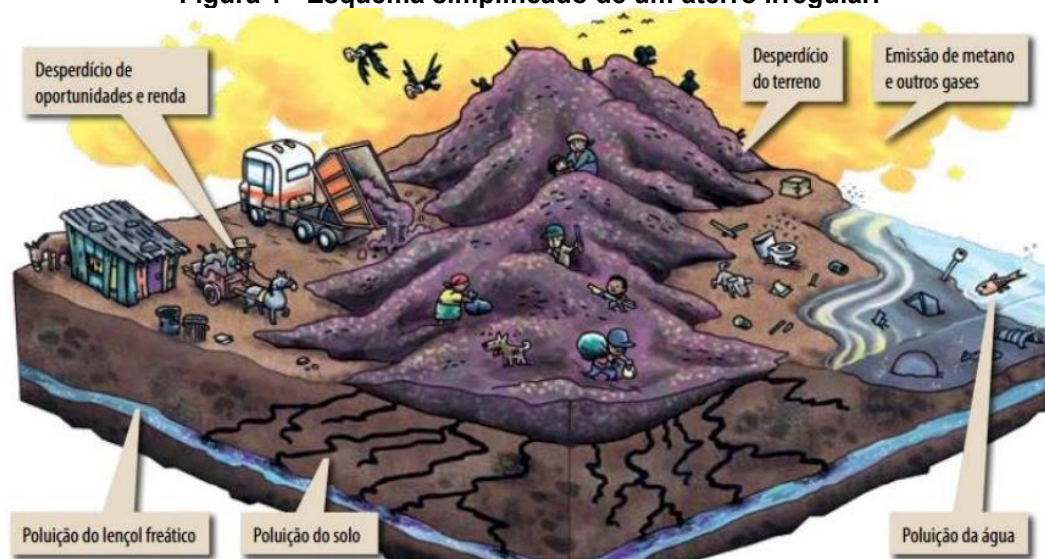
Dentre os componentes do lixiviado apresentados na Tabela 1, destaca-se os compostos de nitrogênio, que são um parâmetro de interesse para os engenheiros ambientais por sua relevância na atmosfera e nos processos biológicos dos seres vivos. Para os estudos de qualidade de água os compostos avaliados são: amônia (NH_3); gás nitrogênio (N_2); nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e uréia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] (CAVALCANTI, 2013).

A partir da relação amônia e nitrato é possível avaliar se o aterro está em condições aeróbias ou anaeróbias. Uma vez que, em condições aeróbias, a amônia oxida-se para nitrito e posteriormente para nitrato; enquanto em condições anaeróbias o nitrato se reduz para nitrito e na sequência para gás nitrogênio (CAVALCANTI, 2013).

No que tange a contaminação ambiental, Monteiro *et al.* (2008) pontuam que tanto os solos quanto às águas subterrâneas são diretamente impactados pelo descarte inadequado dos RSUs devido a lixiviação causada pelo chorume que entra em contato com o solo desprotegido acarretando em processo de destruição de seus agregados e partículas primárias, causando a desnutrição o que produz grande impacto em todas as suas camadas.

A Figura 1 apresenta esquematicamente a contaminação do solo e águas subterrâneas. Em complemento, De Oliveira Brito *et al.* (2021) indicam que a qualidade das águas é susceptível à contaminação do solo, o que também provoca a contaminação dos aquíferos.

Figura 1 - Esquema simplificado de um aterro irregular.



Fonte: ABRELPE (2011).

Conforme pode ser observado na Figura 1, o aterro irregular não possui critérios técnicos para a disposição final de RSUs. O local normalmente é escolhido pela sua distância dos centros urbanos, de maneira que não impacta negativamente na opinião pública, e é instaurado sem planejamento. Deste modo, não há normas e nem ações mitigadoras sobre a produção de chorume ou metano nestes locais, por exemplo. Além disto, também não há uma fiscalização de volume, peso e classe dos resíduos sólidos, sendo então estes um grande aglomerado de resíduos sólidos urbanos, industriais, de saúde e de construção civil, acarretando graves problemas socioambientais (MACHADO, 2022).

3.2 Dados e Políticas Públicas

A Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil – PNRS, é atrelada a Lei nº 12.305/10, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), e estabelece a forma com que o país deve organizar e destinar os resíduos sólidos, dispondo dos princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relativas à gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos, exigindo que os setores públicos e privados gerenciem com transparência os resíduos de sua região. A partir da instauração desta lei, algumas políticas foram sendo tomadas, a fim de diminuir o impacto ambiental negativo e viabilizar a correção dos gerenciamentos que vinham sendo feitos de maneira errada.

Pires e Oliva (2020) apontam que no final de 2014 foi instaurado um prazo para que ocorresse a desativação de todos os aterros irregulares a céu aberto no Brasil. Tal prazo foi adiado para 2018, e em seguida para 2021, prolongando o prejuízo causado às regiões ao redor dos aterros irregulares, e teve como motivação o não cumprimento dos principais objetivos da PNRS, como por exemplo a “eliminação e recuperação dos aterros irregulares existentes, associados a programas de inclusão social e a emancipação econômica da população dependente da recuperação artesanal e reutilização de materiais” (PIRES; OLIVA, 2020, p. 214).

Apesar da ordem de desativação dos aterros irregulares a céu aberto, dados da ABRELPE (2019) apontam que o Brasil ainda possui cerca de 3.000 aterros irregulares ou aterros controlados, ou seja, cerca de 29,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos – RSU por ano, são destinados a locais sem um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger o local, as pessoas ao redor e evitar o impacto ambiental negativo gerado. Costa (2013) acrescenta que, cerca de 80% dos municípios brasileiros destinam seus RSUs a aterros irregulares, de forma que o solo

cada vez mais é poluído, junto às águas e ao ar. Estes impactos negativos geram um custo governamental alto, para que sejam encontradas e desenvolvidas medidas compensatórias do impacto ambiental e dos problemas de saúde gerados, despendendo-se cerca de U\$ 0,9 bilhões/ano para este fim (BRASIL, 2017).

Para o projeto, implementação e operação de aterros de resíduos não perigosos as regras são estabelecidas pela NBR 13.896 (1997), que visa proteger de forma adequada as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, os operadores do local e as populações vizinhas. Ainda segundo a NBR 13.896 (1997) é necessário a existência de uma camada, utilizando materiais naturais ou artificiais, com o objetivo de reduzir ou impedir a percolação de líquidos, por entre a massa de resíduos; e que as áreas para disposição de resíduos sólidos estão restrita a locais com solos ou estruturas geotécnicas com condutividade hidráulica inferior a 5×10^{-7} m/s.

3.3 Métodos geofísicos na engenharia ambiental

Desta forma, com o intuito de gerar menor impacto ambiental, reduzir o risco à saúde da população e a investigação de áreas suspeitas de contaminação, estudos vêm sendo desenvolvidos para estes fins. Para a coleta de dados do meio subterrâneo são empregados métodos diretos e indiretos.

Os métodos diretos de investigação necessitam de processos invasivos no solo, por meio de escavação ou perfuração do subsolo para encontrar o alvo, sendo exemplos de métodos diretos os furos de sondagem e os poços de monitoramento. A metodologia direta permite a coleta de dados restritos, uma vez que considera a perfuração de um único ponto, assim prejudicando a compreensão da extensão da contaminação e se torna desinteressante. Com a finalidade de resolução deste problema pode-se considerar um maior número de pontos de coleta de dados, o que acarreta no maior custo do projeto e também a ação invasiva da escavação de poços (SOARES, 2019).

Em contrapartida tem-se os métodos indiretos, que se caracterizam por serem não invasivos, uma vez que, permitem a coleta de dados subterrâneos sem a necessidade de inserção de suas estruturas no solo. Assim, os métodos geofísicos têm sido cada vez mais utilizados nos estudos de solo e águas subterrâneas, principalmente pois, além do custo baixo e velocidade de informações, os estudos ambientais estão em constante evolução. Torna-se, portanto, cada vez mais

necessário compreender as características geofísicas de alguns determinados locais, objetivando principalmente compreender o grau de contaminação de um determinado local (SANTOS, 2005).

Os métodos geofísicos respondem às variações de propriedades físicas nos meios, e podem ser classificados em passivos e ativos, onde os métodos passivos registram as variações físicas dos meios nos campos magnético, gravitacional e o campo elétrico natural, que já existem na Terra, ao passo que, os métodos ativos precisam gerar e transmitir sinais artificiais, os quais são irradiados ao longo da subsuperfície e são modificados de acordo com o material encontrado (REYNOLDS, 2011).

Reynolds (2011), aponta que os métodos geofísicos ativos podem ser vários, contudo, os métodos eletromagnético indutivo, Eletrorresistividade e GPR são os principais utilizados no mapeamento da pluma de contaminação provocada pela infiltração de chorume dos aterros irregulares. De forma que, a interpretação feita a partir dos dados coletados nos dois métodos geofísicos diminui ambiguidades inerentes a estas interpretações, chegando a uma conclusão mais precisa e válida.

Os métodos geoeletricos se fundamentam na utilização do material de interesse, neste caso rochas e solo, como condutor para uma corrente elétrica. De acordo com Reynolds (2011), a corrente pode ser transmitida através do material de três maneiras: processos dielétricos, eletrolíticos e eletrônicos. A condução por processos dielétricos ocorre quando o material estudado é formado por poucos materiais condutores, sendo aplicada uma corrente alternada, que permite o deslocamento dos elétrons. Os processos eletrolíticos utilizam os poros das rochas como eletrólitos para a condução da corrente elétrica. Já nos processos eletrônicos a condução da corrente elétrica se dá devido a presença de minerais com a característica de serem bons condutores elétricos, como o grafite por exemplo.

3.3.1 Estudos de referência

Na bibliografia especializada é possível encontrar um vasto número de estudos que empregam a geofísica como ferramenta para a caracterização de estudos ambientais, abrangendo trabalhos sobre aterros, considerando suas diferentes formas podendo ser aterros irregulares, controlados e sanitários, os quais são cada vez mais empregam métodos geofísicos por serem não invasivos, apresentarem baixo custo e pela agilidade no processo. A seguir são descritos alguns trabalhos que utilizaram

métodos geofísicos diretamente em estudos sobre depósitos de resíduos, assim possibilitando um maior entendimento das principais metodologias empregadas.

Meju (2000) propôs um modelo de resistividade em relação a profundidade teórica para aterros sanitários antigos e abandonados. Foram usados resultados geoquímicos, geotécnicos e hidrogeológicos das reações espaços-temporais do chorume, no contexto geoeletrico. O autor notou que em áreas onde houve a penetração do lixiviado no subsolo, ocorre um aumento na temperatura, o que propicia o aumento da atividade bacteriana, conseqüentemente o aumento das reações de troca iônica nas regiões mais inferiores das áreas do aterro. O modelo resistivo foi elaborado relacionando a interação do bio-geomorfismo e a hidroquímica nas áreas dos aterros RSU resultando em várias zonas de contaminação.

Elis e Zuquette (2002) empregaram a Eletrorresistividade, através da sondagem e caminhamentos elétricos, para a coleta de dados no antigo depósito de resíduos sólidos urbanos e no aterro sanitário em atividade na cidade de Ribeirão Preto, São Paulo. Neste artigo, os autores concluíram que os resultados obtidos pelas técnicas utilizadas permitiram avaliar o volume de resíduos, o fluxo das águas subsuperficiais e grau de impacto da percolação dos líquidos no meio ambiente.

Shiraiwa *et al.* (2002) investigaram através de método geofísico o aterro irregular desativado de Cuiabá-MT. Foram empregados pelos pesquisadores os métodos de Eletrorresistividade, Eletromagnético e GPR. A partir dos resultados os autores concluíram que havia contaminação por chorume na superfície até o nível freático, para determinar a pluma de contaminação foram delimitados como valores limites: valores baixos de resistividade ($< 20 \text{ Ohm.m}$), valores altos de condutividade ($< 60 \text{ mS/m}$) e áreas que apresentaram atenuação do sinal do GPR.

Moura e Malagutti Filho (2003) escolheram como área para análise o aterro controlado da cidade de Rio Claro/SP e utilizaram os métodos geofísicos de Eletrorresistividade e Polarização induzida. Os autores concluíram que valores de resistividade baixa são associados a elevadas concentrações de íons de cloreto, e outros íons, como nitratos, sulfatos e sódio, os quais favorecem para o aumento da condutividade elétrica do contaminante. Ainda para a análise dos resultados obtidos os autores realizaram uma interpretação conjunta dos dados da resistividade e da Polarização induzida, o que permitiu uma redução da ambigüidade dos modelos geoeletricos possibilitando definir a geometria das cavas de resíduos, zonas de

percolação de chorume e a diferenciação dos litotipos das formações identificando materiais arenosos e siltosos.

Gallas *et al.* (2005) realizaram ensaios geofísicos de Eletrorresistividade no aterro sanitário de Londrina, a fim de detectar e mapear a pluma de contaminação por chorume. Os autores, concluíram que devido a presença de íons diluídos no chorume, as resistividades medidas em áreas contaminadas são baixas.

Laureano e Shiraiwa (2008) através de técnicas geoeletricas, GPR e Eletromagnético indutivo, mapearam a condutividade elétrica no subsolo do aterro sanitário de Cuiabá- MT. Os autores concluíram que a combinação de dois ou mais métodos geofísicos garantem mais consistência aos resultados obtidos. Assim, combinando os resultados os autores observaram que os perfis de GPR exibiram ausência de reflexão em áreas com condutividade acima de 100 mS/m (dado obtido com o método Eletromagnético indutivo), associando a percolação de chorume no subsolo.

Pires *et al.* (2014) avaliaram o impacto do Lixão de Bragança - PA através de método geofísico, utilizando o GPR. A área escolhida se destaca por se localizar próxima a sistemas hídricos. A partir dos dados coletados os autores caracterizam a área do aterro irregular e detectam possíveis plumas de contaminação subterrânea. As áreas de possível contaminação foram identificadas com base nos radargramas que apresentaram atenuação praticamente total do sinal.

Reis *et al.* (2016) investigaram as imediações do Lixão de Alto Paraíso de Goiás - GO em busca de áreas de percolação de chorume. Através da Eletrorresistividade os autores identificaram uma área de possível contaminação, porém após realizarem um furo de sondagem não foi confirmada a contaminação por resíduos sólidos. Com estes resultados os autores concluíram ser necessário a realização de novas investigações no local.

Alves (2018) caracterizou o Lixão municipal de Pirenópolis- GO com técnicas geoeletricas, utilizando GPR e Eletrorresistividade. O trabalho teve como objetivo determinar áreas impróprias para a deposição de RSU, estimar a espessura e a composição do solo, a busca por áreas com percolação de chorume e a determinação do topo rochoso. Com os dados obtidos GPR a autora concluiu que havia padrões de reflexão relacionados ao solo, rochas, RSU e ao chorume percolado. Já com os dados da Eletrorresistividade a autora monitorou o comportamento da pluma de

contaminação a partir de zonas de baixa resistividade. A partir dos resultados a autora conclui que o chorume não extravasou os limites do aterro irregular.

Junqueira (2022) avaliou a contaminação por chorume no aterro controlado de Caldas Novas - GO, para isso foram empregados os métodos geoeletricos, Eletroresistividade e GPR. A partir dos dados coletados a autora concluiu que havia percolação de chorume e seu fluxo já ultrapassa os limites do território do aterro controlado. Outra conclusão da autora foi que a geomembrana, utilizada para impermeabilização das células, se mostrou insuficiente para impedir a percolação do chorume.

Borges *et al.* (2022) selecionou o Lixão de Alto Paraíso de Goiás- GO, como área de estudo. Para coleta dos dados os autores empregaram o GPR, como método geofísico, para a caracterização da área. Os autores concluíram que o uso do GPR, em regiões com solo arenoso e quartzitos, é válido para a detecção de plumas de contaminação e de seus caminhos preferenciais ao longo da zona de saturação. E também, concluíram que a aplicação do GPR tem potencial para a caracterização ambiental de áreas de despejo de resíduos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

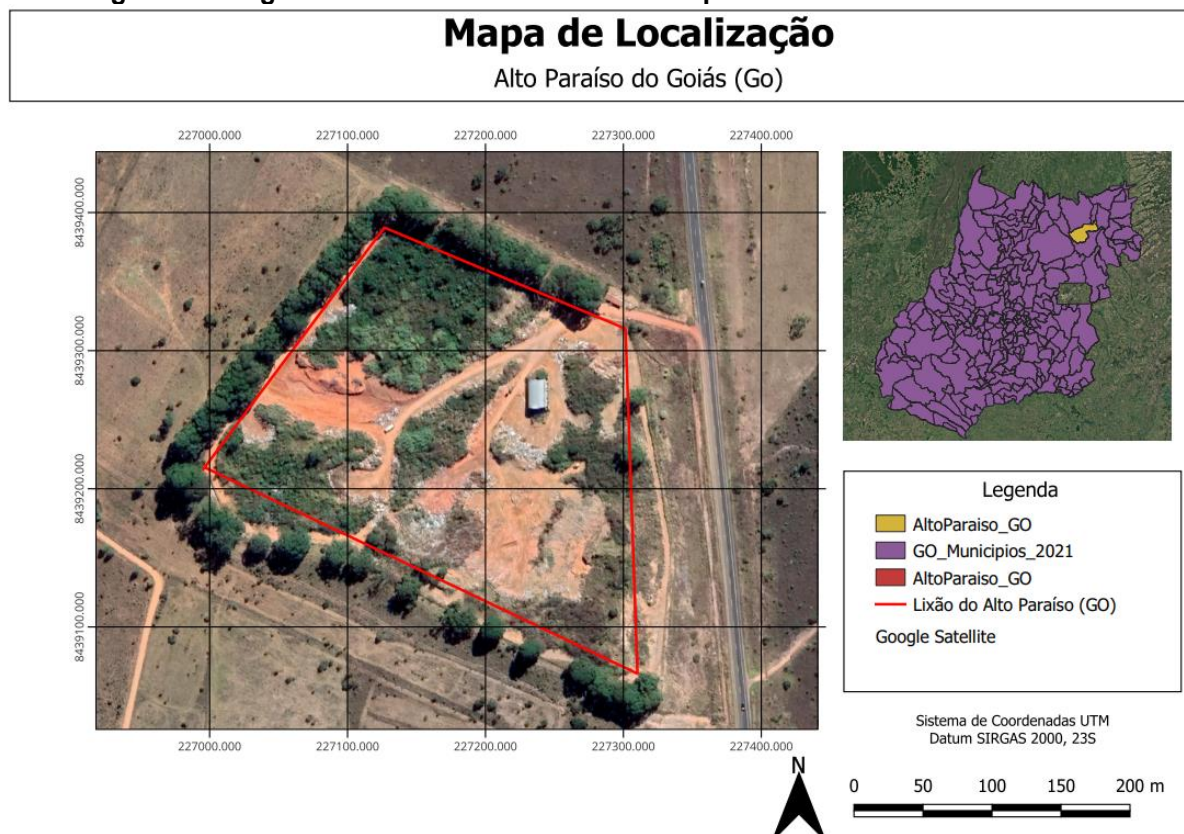
O presente estudo uniu as metodologias de revisão bibliográfica e estudo de caso, a fim de que o trabalho atingisse o seu objetivo. A revisão bibliográfica, conforme Gil (2002) conceitua, é “desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos, embora em quase todos os estudos seja exigido algum tipo de trabalho dessa natureza, há pesquisas desenvolvidas exclusivamente a partir de fontes bibliográficas”. Através da revisão bibliográfica foi possível contextualizar os métodos de ensaio utilizados neste estudo.

Já no que tange o estudo de caso, esta metodologia, que segundo Yin (2001) é “uma observação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto da vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos”, irá auxiliar o presente estudo pois, através desta metodologia foi feito um estudo no Lixão do município de Alto Paraíso de Goiás-GO.

4.1 Caracterização do local de estudo

O local escolhido para a realização do estudo de caso foi o Lixão de Alto Paraíso de Goiás, localizado na região nordeste do estado de Goiás, no município de Alto Paraíso de Goiás que tem sua área urbana em uma altitude de 1253 metros, se encontra nas seguintes coordenadas: Latitude: 14° 8' 1" Sul, Longitude: 47° 31' 17" Oeste e com uma área total de 2.594,998 km² (IBGE, 2021), Figura 2. Segundo dados do censo de 2021 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2010 o município possui uma população de 7.751 habitantes, com densidade demográfica de 2,65 hab/km² (IBGE, 2021). Alto Paraíso de Goiás é a principal cidade do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, que é o maior parque do centro-oeste brasileiro, que ainda acomoda seus resíduos sólidos a céu aberto. Na região que compreende o município de Alto Paraíso de Goiás também há o encontro da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia e a bacia hidrográfica do São Francisco.

Figura 2 - Imagem de satélite do Lixão do município de Alto Paraíso de Goiás-GO.



O Lixão do município de Alto Paraíso de Goiás-GO, localizado a 6 km da área urbana da cidade, às margens da rodovia BR010 (Figura 2). Este foi implantado em uma área sobreposta a litofácies PP4ts2 da formação Arraias (CAMPOS et.al, 2013). As litofácies foram individualizadas de acordo com a presença de quartzitos micáceos com intercalações de metassiltitos, segundo Campos et. al. (2013). Os quartzitos são característicos de um ambiente fluvial entrelaçado, pois são de médio a grossos quartzitos, possuem baixo grau de seleção, e a presença de tabulares cruzadas e estratificações canalizadas (BORGES et. al, 2022).

Borges et. al (2022) realizou a instalação de poços de monitoramento do nível de água, que indicaram a presença de um neossolo quartzarênico (areia de quartzo médio) com espessuras de até 7,5 metros. Almeida et. al (2006) descreve que os neossolos quartzarênicos na Chapada dos Veadeiros têm uma transmissividade hidráulica média de 10^{-5} a 10^{-6} m/s. A NBR 13.896 (1997) estabelece que a implantação de áreas para disposição de resíduos sólidos está restrita a locais com solos ou estruturas geotécnicas com condutividade hidráulica inferior a 5×10^{-7} m/s. Assim, a transmissividade hidráulica do local de implantação do Lixão de Alto Paraíso

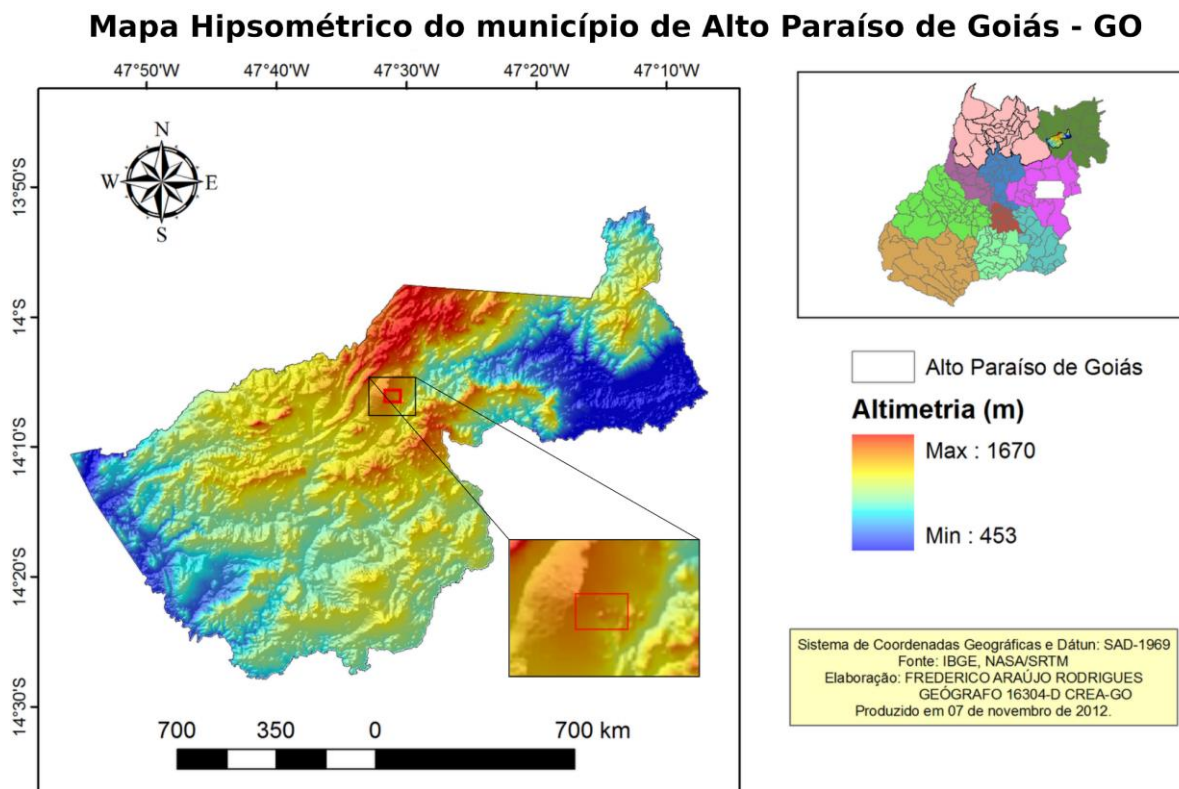
de Goiás apresenta valores acima ao estabelecido pela norma. Devido a essas características do local de construção, a percolação de lixiviado ocorre de forma mais acelerada contaminando o meio subterrâneo. Assim, sendo necessário a aplicação de investigações no Lixão de Alto Paraíso de Goiás para avaliação das condições do solo e dos impactos ambientais utilizando metodologias que permitam a caracterização.

A coleta de resíduos sólidos no município e conseqüente deposição no Lixão de Alto Paraíso de Goiás teve início em 1993 (OLIVEIRA JR, 2017). Os RSU foram dispostos a céu aberto até 2016. Depois disso, a prefeitura autorizou a escavação de valas e o enterramento de resíduos sem nenhum tipo de impermeabilização (BORGES *et al.*, 2022). Essa forma de descarte dos RSUs ainda é inadequada, uma vez que a NBR 8.419 (ABNT, 1992) exige a implantação de um sistema de impermeabilização de fundo no projeto do aterro sanitário, para reter o lixiviado e evitar a contaminação, reduzindo os impactos.

A produção estimada de resíduos sólidos no município é de 2,4 toneladas por dia (PFEIFFER *et al.* 2017). Se o lixiviado superficial ou subterrâneo escoar para fora da área da Lixão de Alto Paraíso de Goiás, a drenagem a ser comprometida é o Rio São Bartolomeu que passa pela parte leste da cidade.

Na Figura 3, se observa o mapa hipsométrico da cidade de Alto Paraíso de Goiás, onde foi destacado em um retângulo vermelho a área que compreende a Lixão de Alto Paraíso de Goiás.

Figura 3 - Mapa hipsométrico do município de Alto Paraíso de Goiás-GO, destacando a localização do Lixão de Alto Paraíso de Goiás em um retângulo vermelho.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2022).

Ao observar a hipsometria no local do Lixão de Alto Paraíso de Goiás, Figura 3, é possível notar que o fluxo do escoamento nesta área ocorre do Noroeste em sentido a Sudeste.

4.2 Ground Penetrating Radar – GPR

A sigla GPR se origina do inglês *Ground Penetrating Radar* ou radar de penetração no solo e consiste na utilização de um equipamento, capaz de emitir ondas eletromagnéticas de alta frequência, na faixa da radiofrequência, para percorrer um caminho alvo buscando detectar estruturas e feições geológicas rasas ou identificar artefatos enterrados (JARENTCHUK, 2013). Segundo Jarentchuk (2013), na literatura é possível encontrar várias faixas de frequência para a operação do GPR (10 a 2600 MHz) que objetivam identificar grandes profundidades (menores frequências) e maiores resoluções (altas frequências).

Os campos eletromagnéticos são gerados por uma antena dipolar, a antena transmissora, que é posicionada sobre o solo e após ser aplicada uma diferença de

potencial em seus terminais inicia o processo de transmissão de ondas eletromagnéticas para o meio que a rodeia. Esse campo após interagir com as estruturas da subsuperfície são captadas pela antena receptora na forma de sinal refletido, permitindo a visualização da imagem do subsolo (LIMA, 2006).

Deste modo, os dados obtidos pelo equipamento se referem a diferença da velocidade de emissão e recepção do sinal, sendo dependente das características de cada estrutura imageada, podendo ser comparada a dados sísmicos (JARENTCHUK, 2013).

Conforme Jarentchuk (2013) às propriedades elétricas dos materiais, condutividade, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética, estão diretamente ligadas ao comportamento na subsuperfície das ondas eletromagnéticas e no grau de penetração deste sinal.

Os fatores que influenciam a profundidade de penetração do sinal de GPR durante a propagação das ondas eletromagnéticas estão relacionados à perda de energia devido o espalhamento geométrico, a atenuação pelo terreno e a partição da energia nas interfaces (ORTEGA, 2006, p. 44).

A frequência da antena influencia na resolução do GPR e na profundidade de investigação. Sendo assim, a frequência é diretamente proporcional à resolução vertical, mas é inversamente proporcional à profundidade de investigação (ORTEGA, 2006). E isso quer dizer que quanto maior a frequência melhor é a resolução, mas menor é a profundidade de investigação, uma vez que o sinal é perdido mais rapidamente.

4.2.1 Metodologia aplicada para o GPR

O equipamento usado em campo consistiu na unidade de controle do sistema SIR3000, Figura 4, fabricado pela *Geophysical Survey Systems Inc.* (GSSI). A aquisição de dados ocorreu com o registro de traços usando-se as técnicas do perfil de afastamento comum (*common offset*) e a técnica da sondagem de velocidade do tipo ponto médio comum (*common middle point – CMP*). Nas seções de afastamento comum, a unidade de controle foi acoplada a um par de antenas blindadas de 200 MHz, ao passo que nas CMPs usaram-se antenas não blindadas de 80 MHz.

Figura 4 - Fotografias evidenciam a aquisição de dados de GPR na área do Lixão de Alto Paraíso de Goiás. (A) unidade de controle do GPR SIR3000 e as antenas não blindadas de 80 MHz que foram usadas na aquisição de dados do tipo CMP. (B) registro da aquisição de dados do tipo CMP. (C) e (D) registros da aquisição de dados GPR no modo common offset.

(A)



(B)



(C)



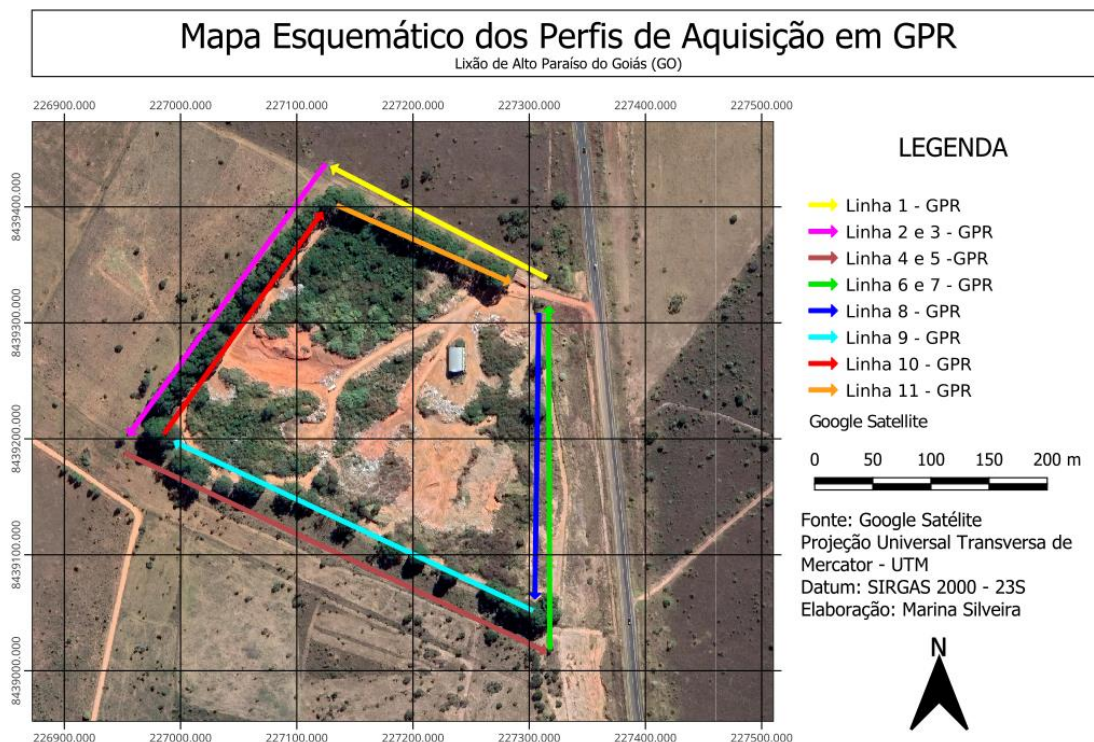
(D)



Fonte:Autora (2022).

Para a aquisição de dados com o GPR foram consideradas oito linhas, sendo quatro linhas na área externa ao Lixão de Alto Paraíso de Goiás e quatro na área interna do mesmo aterro irregular, considerando as bordas, conforme pode ser visto na Figura 5, com a finalidade de verificar se houve extravasamento do lixiviado e potencial contaminação subterrâneas no entorno do aterro irregular. Os dados foram coletados nos dias 22 e 23 de julho de 2022.

Figura 5 -Esquema com a localização e o sentido adotado para aquisição dos dados de GPR na área interna e externa do Lixão de Alto Paraíso de Goiás.



Fonte: Autora (2022).

Os dados coletados foram processados utilizando o software ReflexW versão 7.2.4, da empresa alemã *Sandmeier*, com o objetivo de permitir uma melhor interpretação destes melhorando a razão sinal e ruído. Inicialmente foi aplicado o *Static correction*, correção estática, visando a correção do atraso na primeira chegada da onda eletromagnética. Na sequência, foi aplicado o *gain function*, ganho de função, e o *AGC Gain*, Controle de ganho automático, com o objetivo de melhorar a visualização dos dados e facilitar a interpretação das imagens. E por fim, foi aplicado o *Background Removal*, remoção de fundo, buscando eliminar os ruídos dos dados.

4.3 Eletrorresistividade

A metodologia usada na Eletrorresistividade, conforme apontam Bortolin e Malagutti Filho (2010) é fundamentada no fato de que a resistividade elétrica de diferentes materiais apresentam valores também diferentes, de forma que é possível detectar essa resistividade (ρ) intrínseca a cada material, sendo ele geológico ou não, através da dificuldade encontrada por uma corrente elétrica induzida de se propagar

ou não através daquele meio, considerando também a natureza e o estado físico do meio estudado.

Para que esta metodologia seja aplicada, usam-se de eletrodos metálicos para injetar corrente elétrica (I) no meio, e registra-se a diferença de potencial – ddp (ΔV) em par de eletrodos. Sendo assim, os cálculos estão baseados na Lei de Ohm, que considera um fator de espaçamento entre estes dois eletrodos (K), e consegue calcular a resistividade aparente (ρ_a) através da relação com a ddp, conforme apresenta a Equação 1 (BORTOLIN; MALAGUTTI FILHO, 2010).

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad \text{Equação 1}$$

Como diferentes materiais interagem de formas distintas à corrente aplicada, a coleta dos valores de resistividade elétrica se torna interessante, uma vez que possibilita um maior entendimento das características subterrâneas. Segundo Soares (2019), os principais fatores que influenciam na resposta dos materiais em termos de resistividade são: a quantidade de água encontrada nos poros, a composição mineralógica, a temperatura e o teor de sólidos totais dissolvidos.

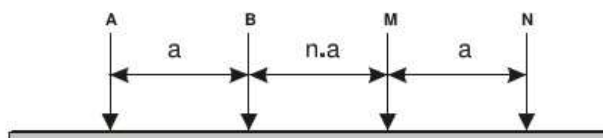
Quando se considera a percolação do chorume em áreas no entorno de aterros irregulares é possível mapear anomalias indicativas de potencial presença de plumas de contaminação, uma vez que apresentam baixas resistividades em consequência aos altos teores de sólidos totais dissolvidos provenientes da decomposição de RSU.

4.3.1 Metodologia aplicada para a Eletrorresistividade

O equipamento utilizado foi o resistivímetro SYSCAL-PRO da marca IRIS Instruments. E a técnica empregada para a aquisição de dados foi o caminhamento elétrico a partir do arranjo dipolo-dipolo, por ser a forma mais utilizada em estudo ambientais de campo, em virtude de sua praticidade e rapidez (REYNOLDS, 1997). Ainda conforme Ortega (2006, p. 51), “a sua principal utilidade consiste no mapeamento da variação lateral e em profundidade condutividade elétrica do meio, podendo caracterizar plumas de contaminação”.

O arranjo dipolo-dipolo pode ser visto na Figura 6, onde o conjunto de eletrodos AB injeta a corrente e o par de eletrodos MN realiza a leitura da corrente, os eletrodos são inseridos em linha.

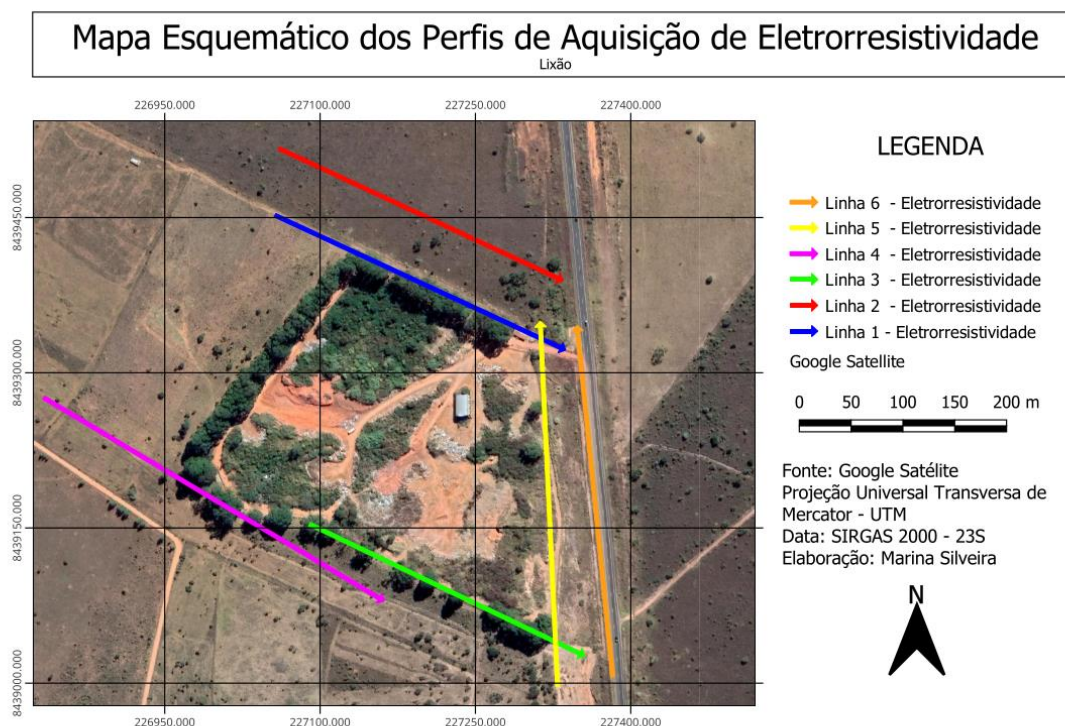
Figura 6 - Disposição dos eletrodos no arranjo Dipolo-dipolo.



Fonte: Ortega (2006, p. 52).

Os dados foram coletados considerando uma distância de 10 m entre os eletrodos e foram consideradas seis linhas para a coleta dos dados, conforme observado na Figura 7. Não foram coletados dados da lateral oeste do Lixão de Alto Paraíso de Goiás devido a características topográficas do local. A aquisição dos dados foi realizada no dia 23 de julho de 2022.

Figura 7 - Esquema com a localização e o sentido adotado para aquisição dos dados de Eletroresistividade na área interna e externa do Lixão de Alto Paraíso de Goiás.



Fonte: Autora (2022).

Para o processamento dos dados foi utilizado o programa Prosys II, da IRIS *Instruments*. A rotina de tratamento dos dados iniciou-se com a eliminação dos dados espúrios de resistividade e a aplicação do *absolute rho value*. Empregando a distribuição gaussiana foi determinado o valor de corte para a filtragem dos dados. Na sequência são inseridos os valores de elevação dos eletrodos para os dados de resistividade.

Os dados filtrados foram exportados para o software RE2DINV, no qual foram eliminados os *bad data points*, que se apresentam, geralmente, como *spikes*, assim não apresentando a mesma tendência dos dados adjacentes. Posteriormente, é aplicada a inversão robusta e é gerada uma seção 2D com base no modelo de blocos retangulares. A partir do modelo de blocos é possível determinar a resistividade através de uma seção de resistividade aparente e resistividade calculada, que deve se aproximar das medidas obtidas em campo. O processo de interação durante a inversão dos dados permite a redução da diferença entre os dados coletados e os dados calculados, ajustando os valores nos blocos do modelo. Por fim, é realizada a filtragem TRIM, e o processo de inversão é executado novamente. Os dados obtidos por esses processos são utilizados para a formação de histogramas de resistividade, a fim de definir a mesma escala de resistividade para todas as linhas. Porém, como os parâmetros de aquisição das linhas 1 e 2 foram diferentes das demais linhas, foram realizadas duas escalas, sendo uma para as linhas 1 e 2, e uma para as linhas 3 a 6.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos e suas interpretações serão apresentados neste capítulo.

5.1 *Ground Penetrating Radar – GPR*

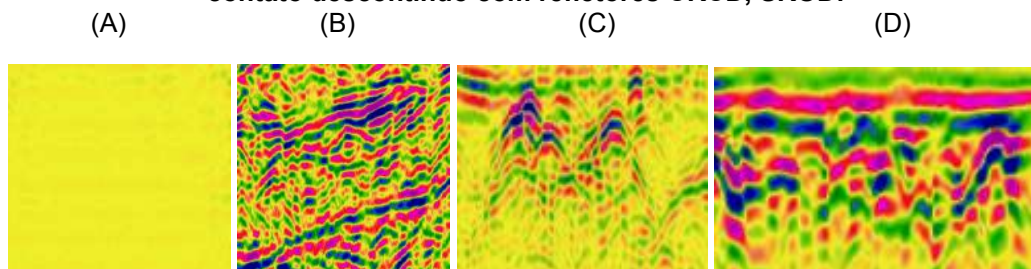
Os dados obtidos pelo GPR foram analisados empregando a classificação descrita por Neal (2004), o qual caracteriza os padrões dos sinais refletidos, permitindo associar cada um desses padrões a diferentes interpretações. Regiões que apresentam atenuação do sinal estão associadas a possíveis plumas de contaminação (GALLAS, 2005). Assim, busca-se nos perfis do GPR áreas com atenuação do sinal.

Analisando os perfis de GPR coletados no Lixão de Alto Paraíso de Goiás foi possível identificar quatro padrões distintos de refletores, Figura 8, que são descritos a seguir:

- RFF (*reflection free*): se relaciona a atenuação do sinal, e esse fenômeno ocorre devido a presença de chorume no solo (Figura 8A), podendo ser interpretado como uma evidência de uma potencial pluma de contaminação.
- DPROD (*dipping planars reflectors, obliques and discontinuous*): são refletores planos, oblíquos e descontínuos de alta amplitude (Figura 8B), os quais são padrões de rochas do local uma vez que a inclinação dos refletores coincide com as foliações e estratificação das rochas da região, bem como a presença da superfície de descontinuidade no topo (BORGES *et al.*, 2022).
- CRCD (*convex reflectors, chaotic and discontinuous*): se caracterizam como reflexões convexas, caóticas e descontínuas e de baixa amplitude (Figura 8C), que se associam ao padrão de solo, pequenos blocos de rocha, raízes e tocas de animais (BORGES *et al.*, 2022).
- SROD (*Sinuuous reflectors, obliques and divergents*): que apresenta refletores caóticos com alta amplitude e associados a um contato descontínuo com refletores CRCD (BORGES *et al.* 2022) (Figura 8D).

Esse padrão é interpretado como resíduo sólido urbano e é típico de valas residuais.

Figura 8 - Padrões de reflexão encontrados no Lixão de Alto Paraíso de Goiás. (A) Padrão sem reflexão do sinal, RFF. (B) Padrões de refletores planos, oblíquos e descontínuos de alta amplitude, DPROD. (C) Padrões de refletores convexos, caóticos e descontínuos e de baixa amplitude, CRCD. (D) Padrões de refletores caóticos com alta amplitude e associados a um contato descontínuo com refletores CRCD, SROD.

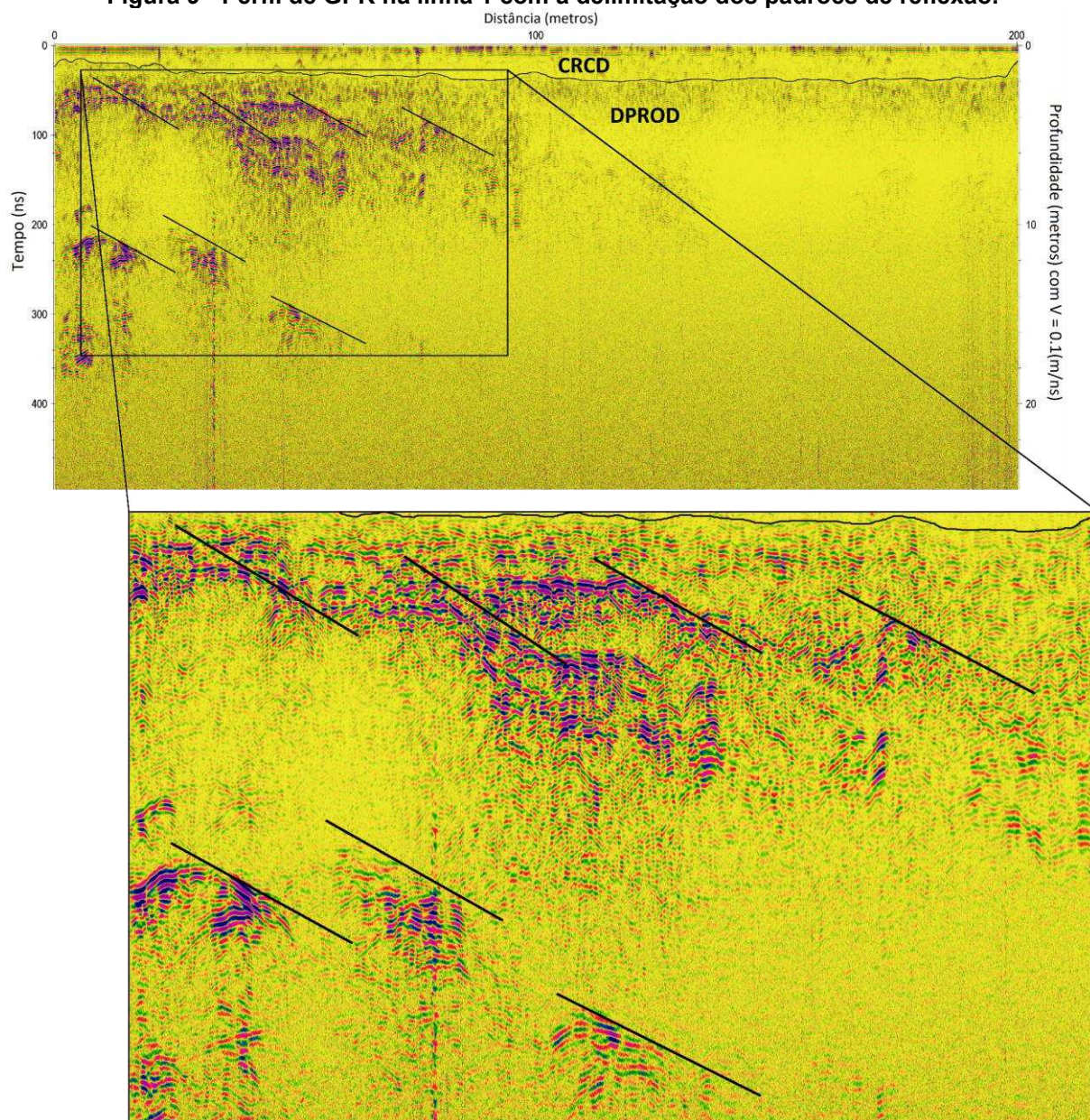


Fonte: Autora (2022).

A seguir são apresentados os perfis obtidos para as linhas externas do Lixão de Alto Paraíso de Goiás onde as linhas pretas contínuas que seguem por toda a imagem representam a divisão entre os padrões CRCD e DPROD, as retas na área do DPROD destacam os mergulhos da reflexão planar, indicando as foliações rochosas.

Analisando o perfil obtido na linha 1, Figura 9, que corresponde à face norte do aterro irregular, é possível observar a delimitação entre o CRCD e DPROD de forma clara, ainda podem ser visto refletores relacionados às foliações das rochas, que foram destacados na Figura 9. Nesta região não foram detectados padrões de reflexão relacionados a possíveis áreas de percolação do chorume.

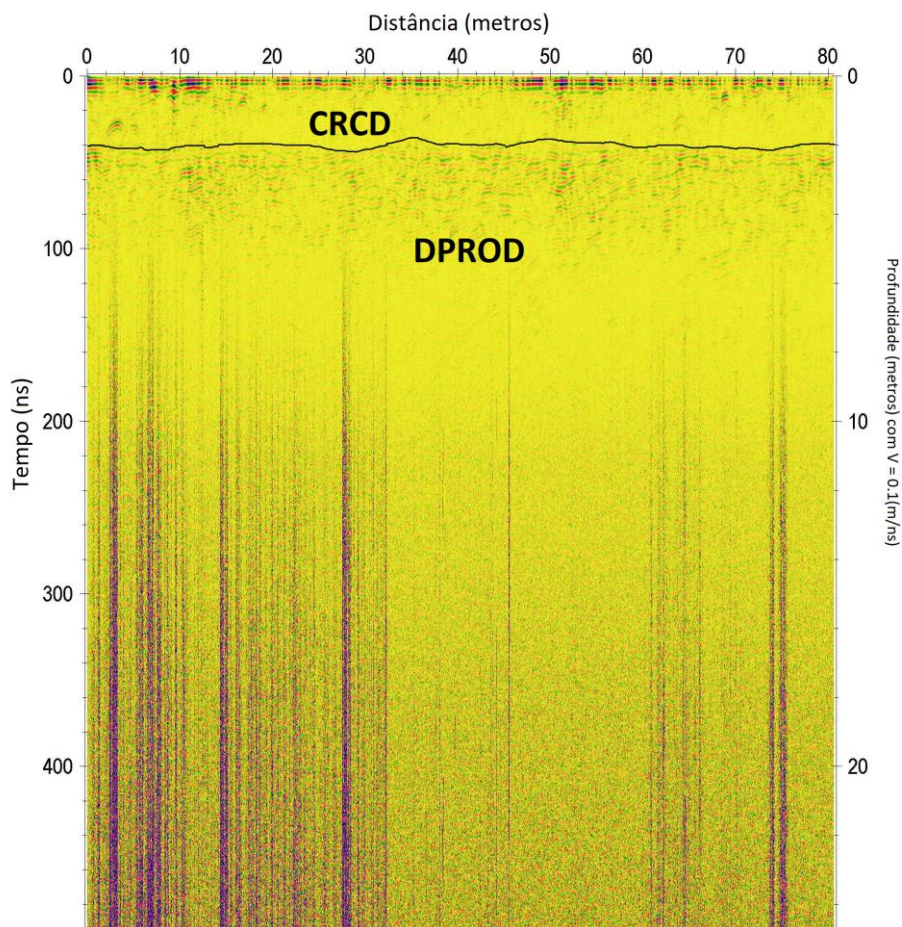
Figura 9 - Perfil de GPR na linha 1 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

No perfil da linha 2, Figura 10, que pertence a lateral oeste do aterro irregular, também não foram encontradas possíveis locais de contaminação. No perfil observou-se apenas os aspectos geológicos do local.

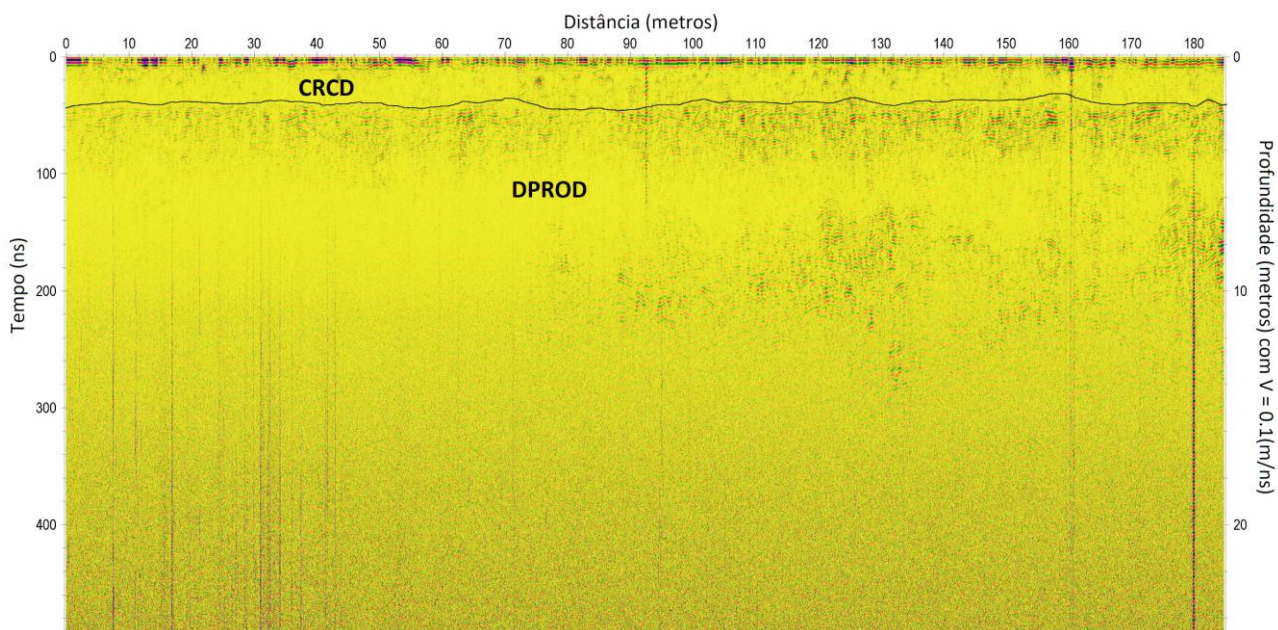
Figura 10 - Perfil de GPR na linha 2 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

Na Figura 11 pode ser vista a continuação da coleta de dados para a lateral oeste do Lixão de Alto Paraíso de Goiás, perfil de GPR na linha 3, onde foi possível observar que não há contaminação.

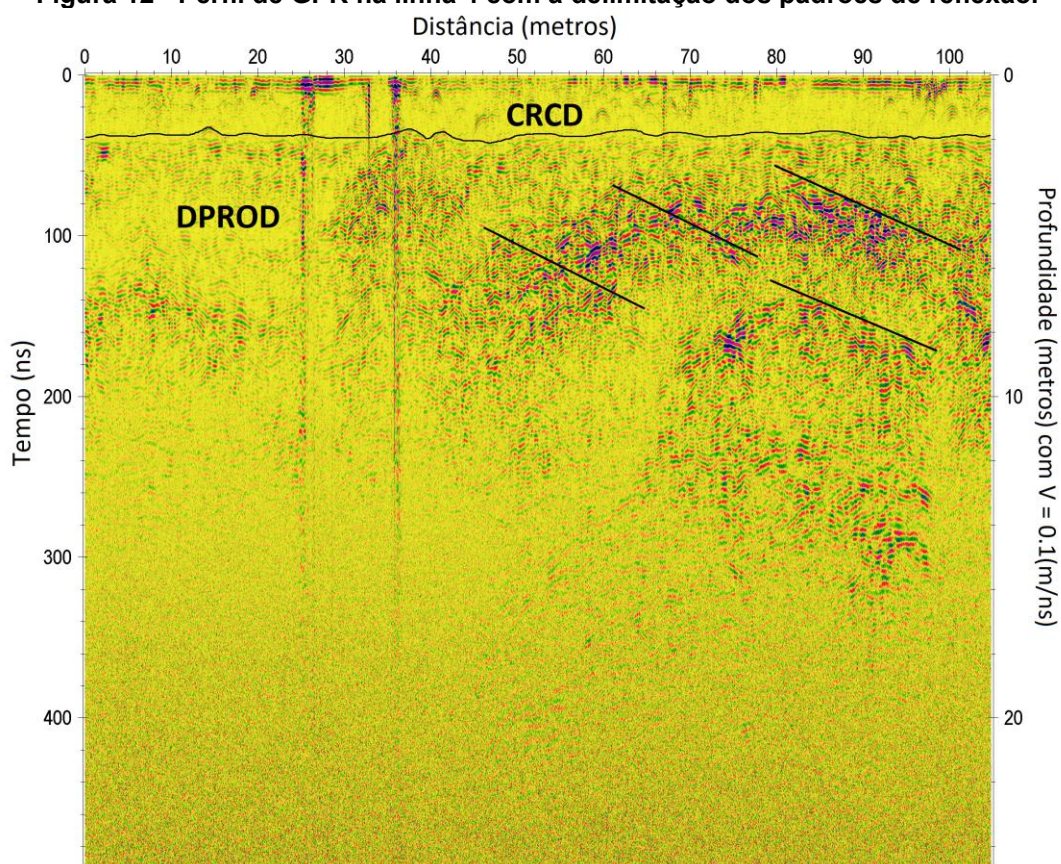
Figura 11 - Perfil de GPR na linha 3 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

No perfil da linha 4, Figura 12, que continua no perfil da linha 5, Figura 13, também não foram encontradas prováveis regiões de contaminação, portanto não houve extravasamento do chorume na face sul do Lixão de Alto Paraíso de Goiás.

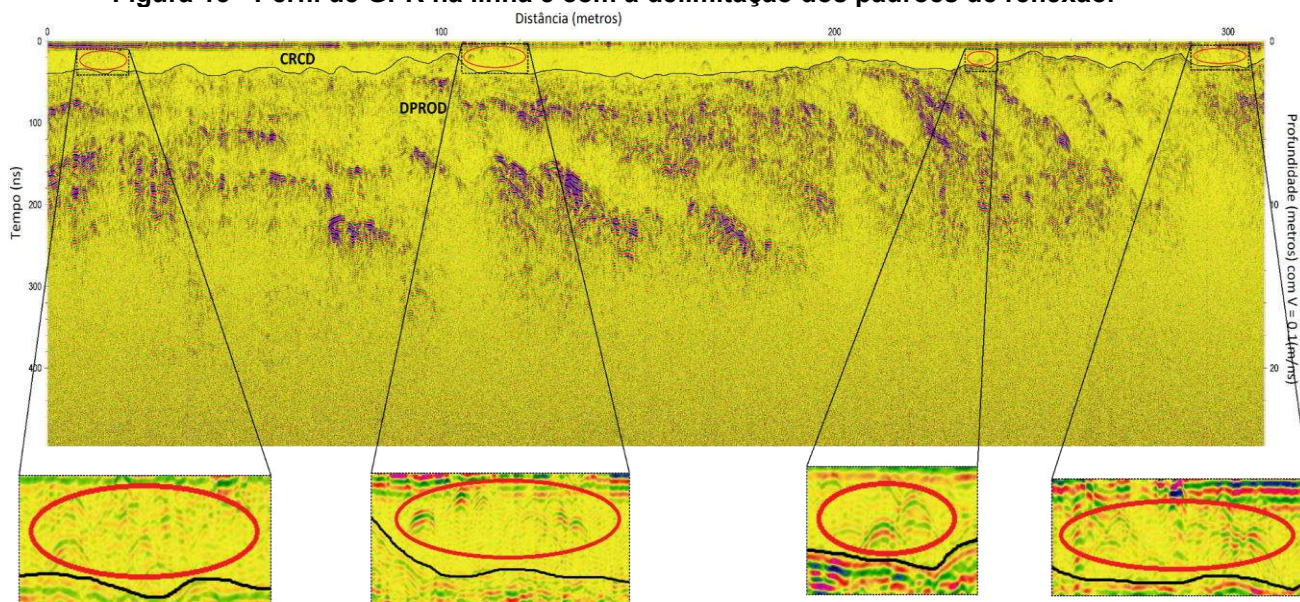
Figura 12 - Perfil de GPR na linha 4 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

No perfil da linha 5, Figura 13, foram destacados por elipses em vermelho, os padrões das ondas que permitem identificar o CRCD.

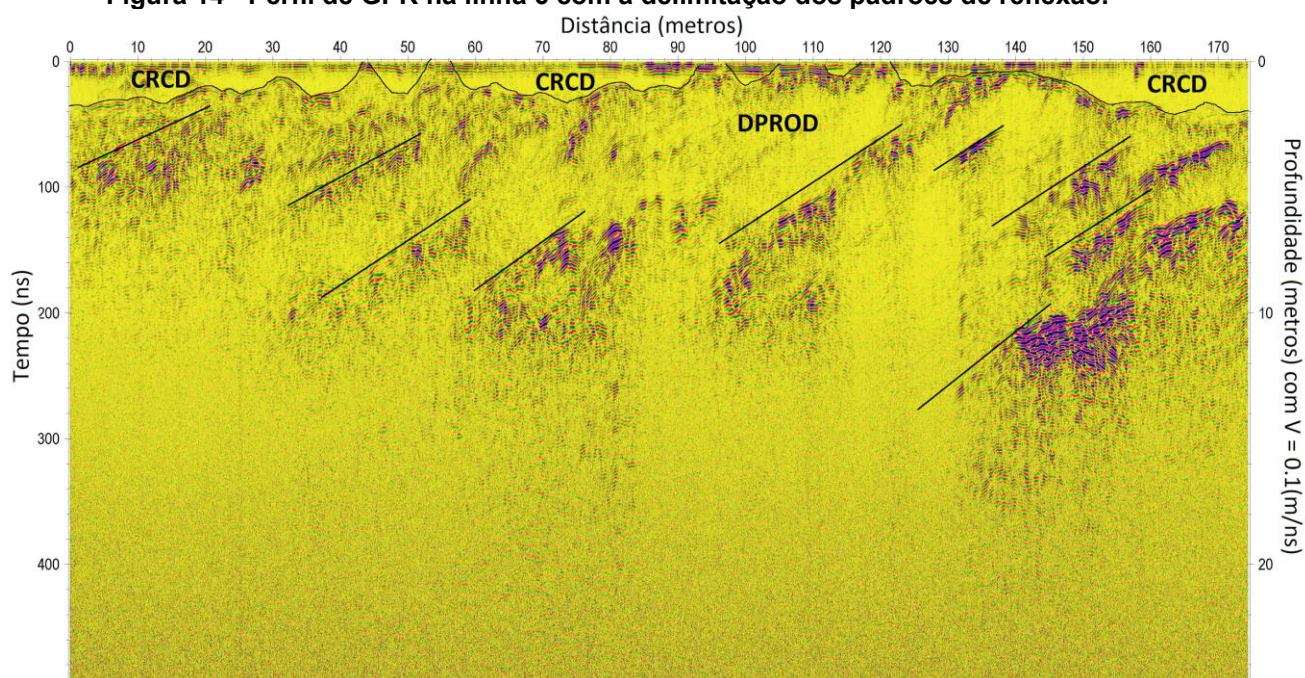
Figura 13 - Perfil de GPR na linha 5 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

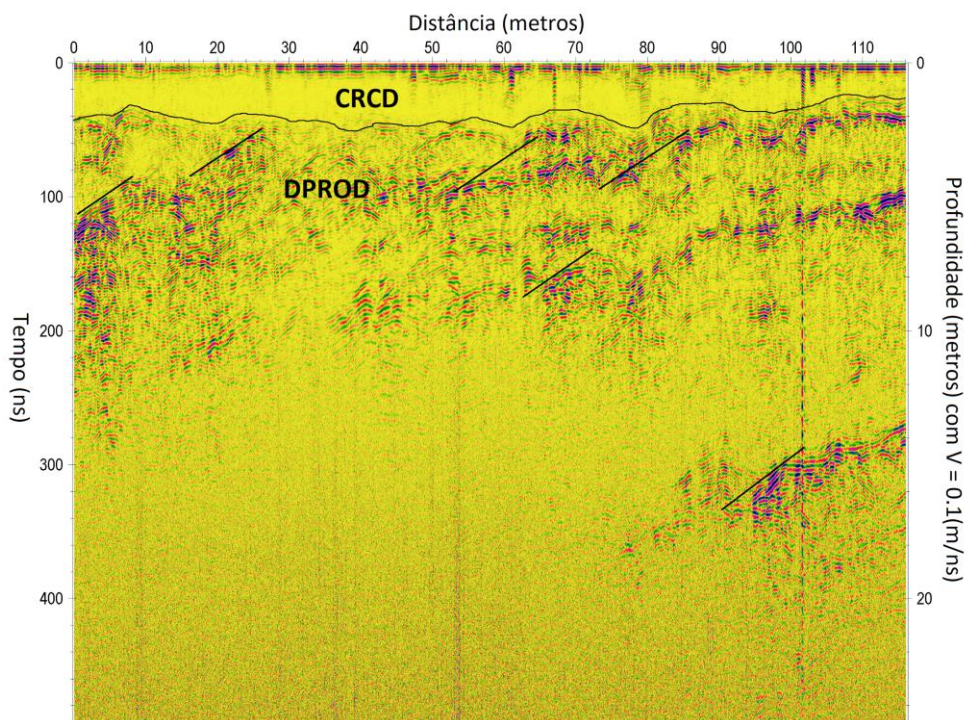
Nas Figuras 14 e 15, é observado o perfil do GPR para a linha 6, onde a Figura 15 é a continuação da coleta de dados iniciada na Figura 14. Analisando os perfis para estas linhas, da área externa, que correspondem à face leste do Lixão de Alto Paraíso de Goiás, também não foram encontrados indícios de contaminação.

Figura 14 - Perfil de GPR na linha 6 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

Figura 15 - Perfil de GPR na linha 7 com a delimitação dos padrões de reflexão.

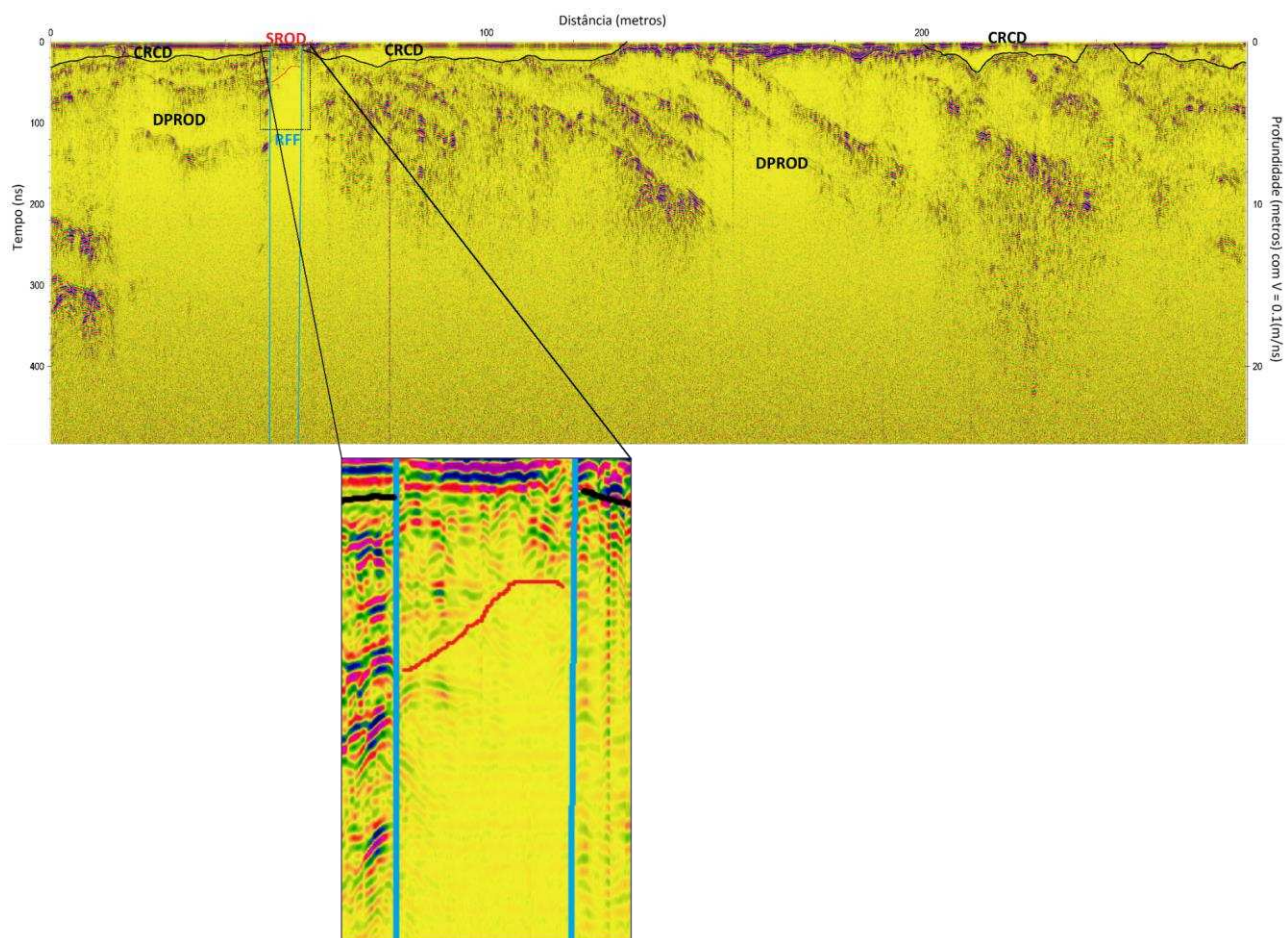


Fonte: Autora (2022).

Através dos resultados obtidos pela metodologia GPR para região externa foi possível concluir que não há áreas de potencial contaminação nesse local, portanto não houve extravasamento de chorume até o momento, mesmo não havendo nenhum método de prevenção implementado no Lixão de Alto Paraíso de Goiás.

No perfil do GPR da linha 8, Figura 16, é observada uma potencial pluma de contaminação nos marcos de 50 e 61 m, devido a atenuação do sinal presente neste local, que foi destacada entre as linhas azuis. Nessa mesma região na área superior é possível observar um provável acúmulo de RSU, que se caracteriza com o padrão SROD.

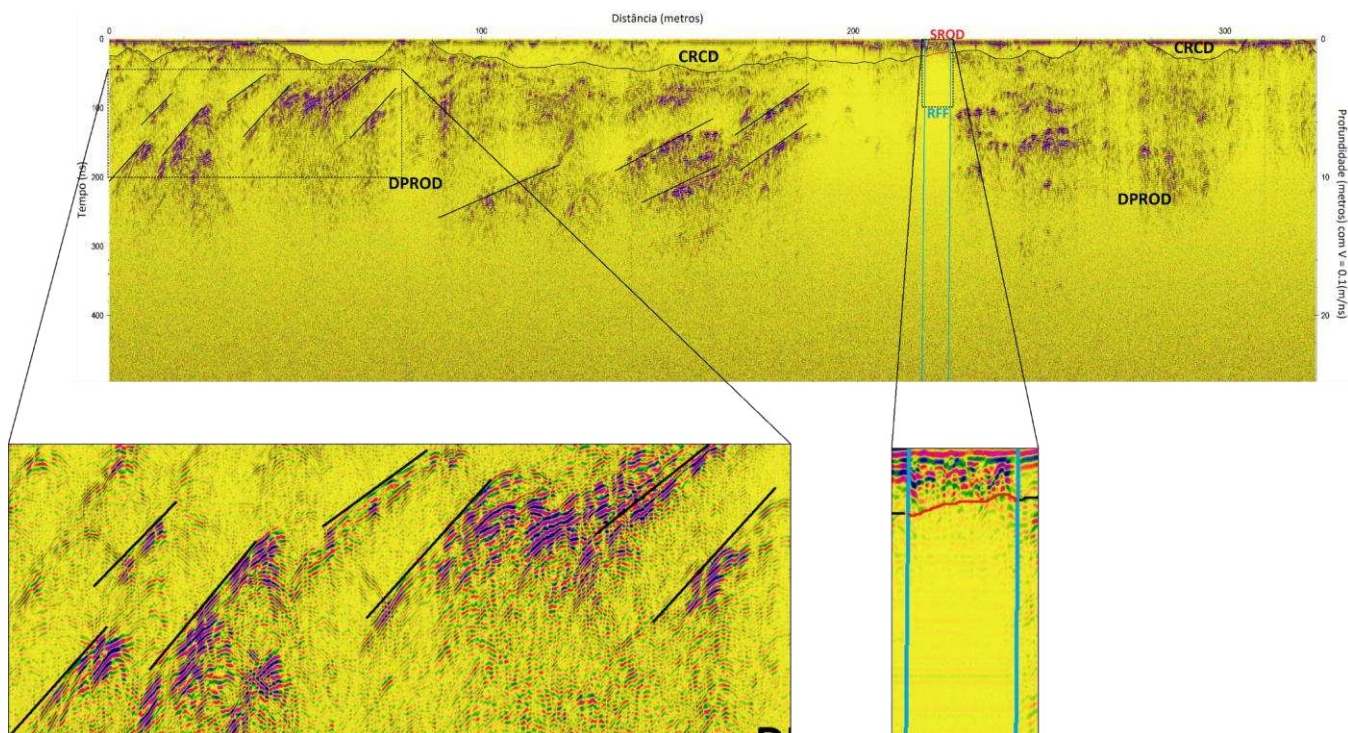
Figura 16 - Perfil de GPR na linha 8 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

Com os resultados da linha 9, como é possível verificar na Figura 17, que representa a face sul do aterro irregular. Também é possível verificar a presença dos padrões SROD e RFF, que representam, respectivamente, a possível presença de resíduos sólidos e chorocho percolado no solo. Essa região se encontra entre 218 e 225 m.

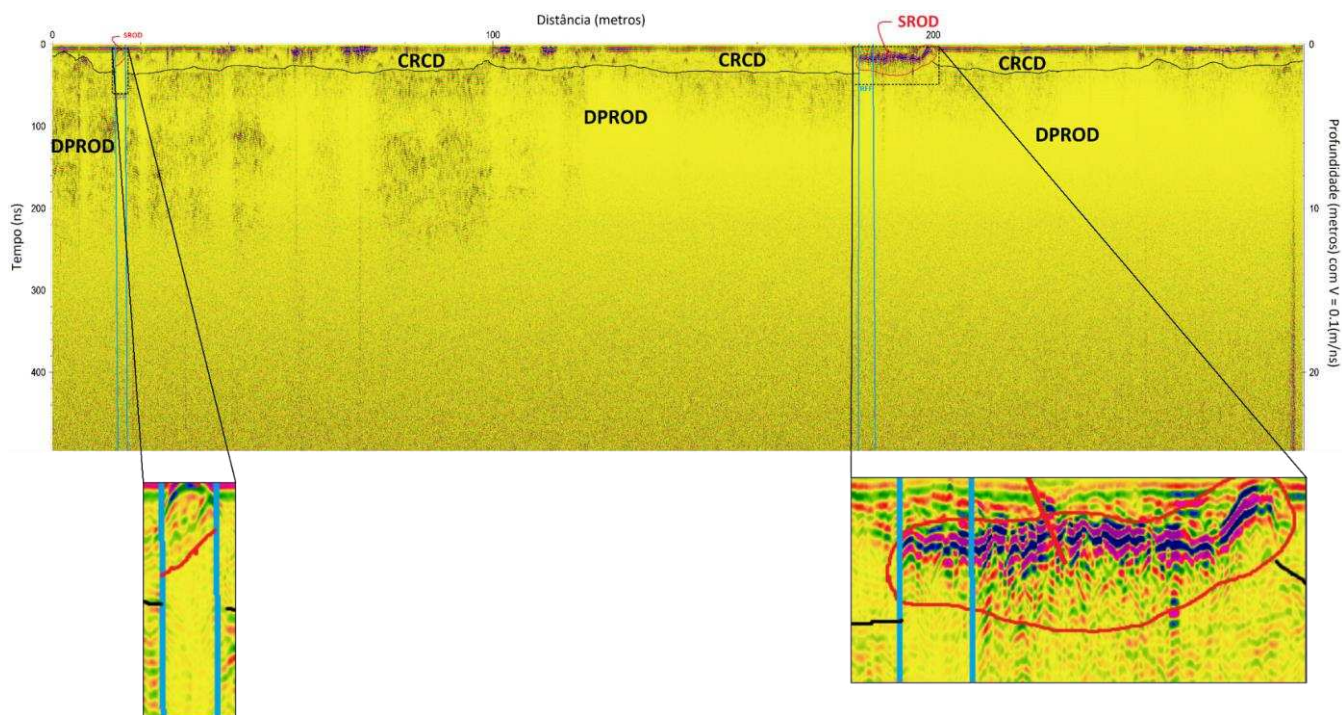
Figura 17 - Perfil de GPR, na linha 9 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

Os resultados obtidos para a linha 10, Figura 18, mostram entre 15 e 17 m uma região que apresenta padrões SROD e RFF, esses padrões também foram encontrados entre 180 e 185 m. Assim, como nas análises anteriores representam que na parte superior da subsuperfície há um depósito de RSU e logo abaixo ocorre uma possível percolação de lixiviado.

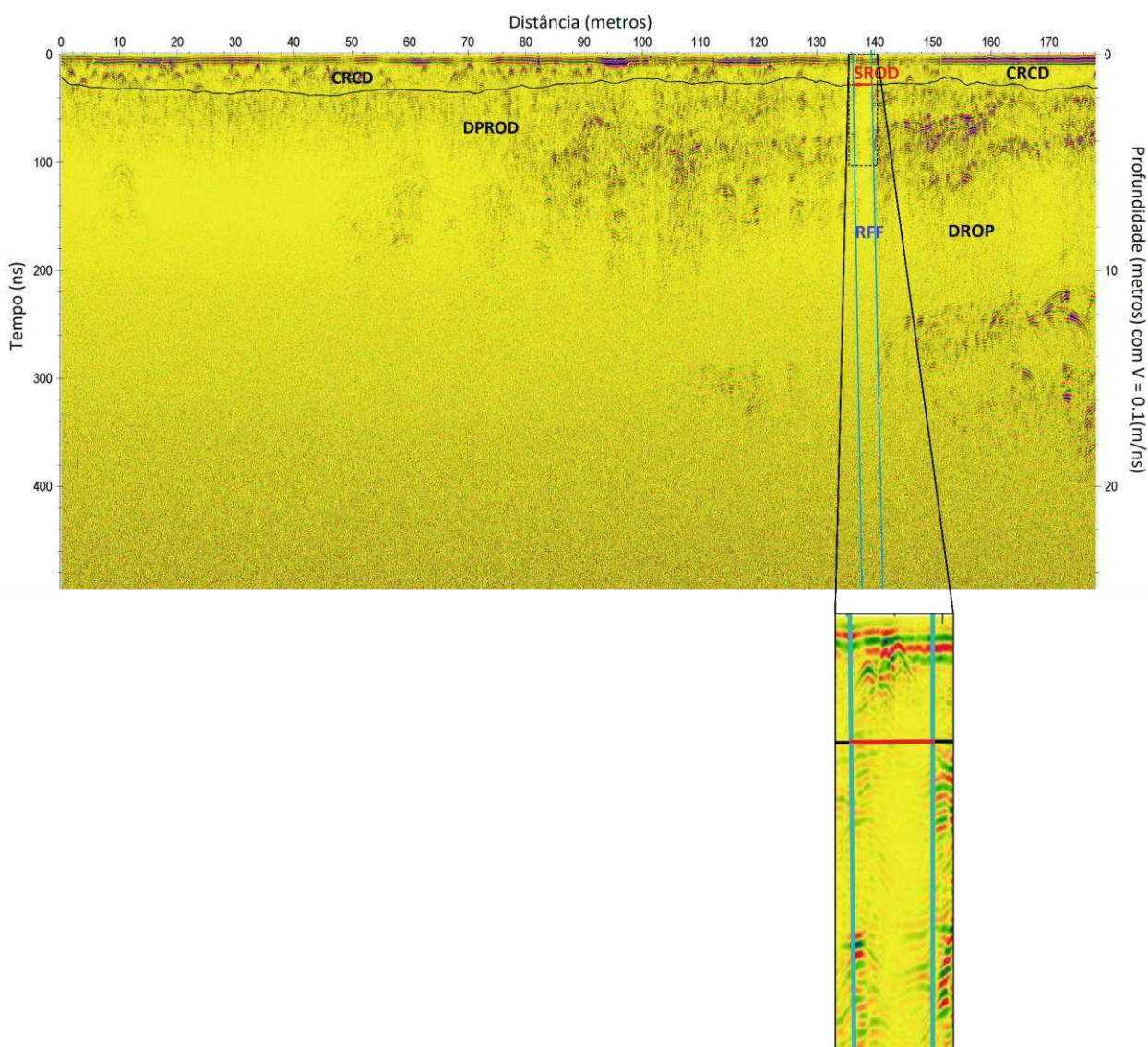
Figura 18 - Perfil de GPR na linha 10 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

Percorrendo a linha 11 no perfil, Figura 19, é observado uma possível percolação de chorume, no marco de 138 a 140 m da leitura da linha 11, que foi destacada entre as linhas azuis. Nessa mesma região na área superior é possível observar um provável acúmulo de RSU.

Figura 19 - Perfil de GPR na linha 11 com a delimitação dos padrões de reflexão.



Fonte: Autora (2022).

A partir dos resultados obtidos empregando a metodologia do GPR foi possível observar prováveis plumas de contaminação em todas as laterais do Lixão de Alto Paraíso de Goiás na parte interna, conforme foi destacado na Figura 20. Assim, comprovando que a má gestão do descarte do RSU pode acarretar na contaminação da subsuperfície, solo e águas subterrâneas, através da percolação do lixiviado. Porém, como os métodos geofísicos podem apresentar certo nível de incerteza conforme exposto por Reis *et al.* (2016) são necessárias mais investigações para a comprovação desta contaminação. Para corroborar com os dados obtidos pelo GPR foi utilizada a Eletrorresistividade, os dados obtidos a partir dessa metodologia são apresentados a seguir.

Figura 20 - Mapa de localização dos perfis de GPR, apontando os perfis sem potencial contaminação e os perfis com potencial contaminação.



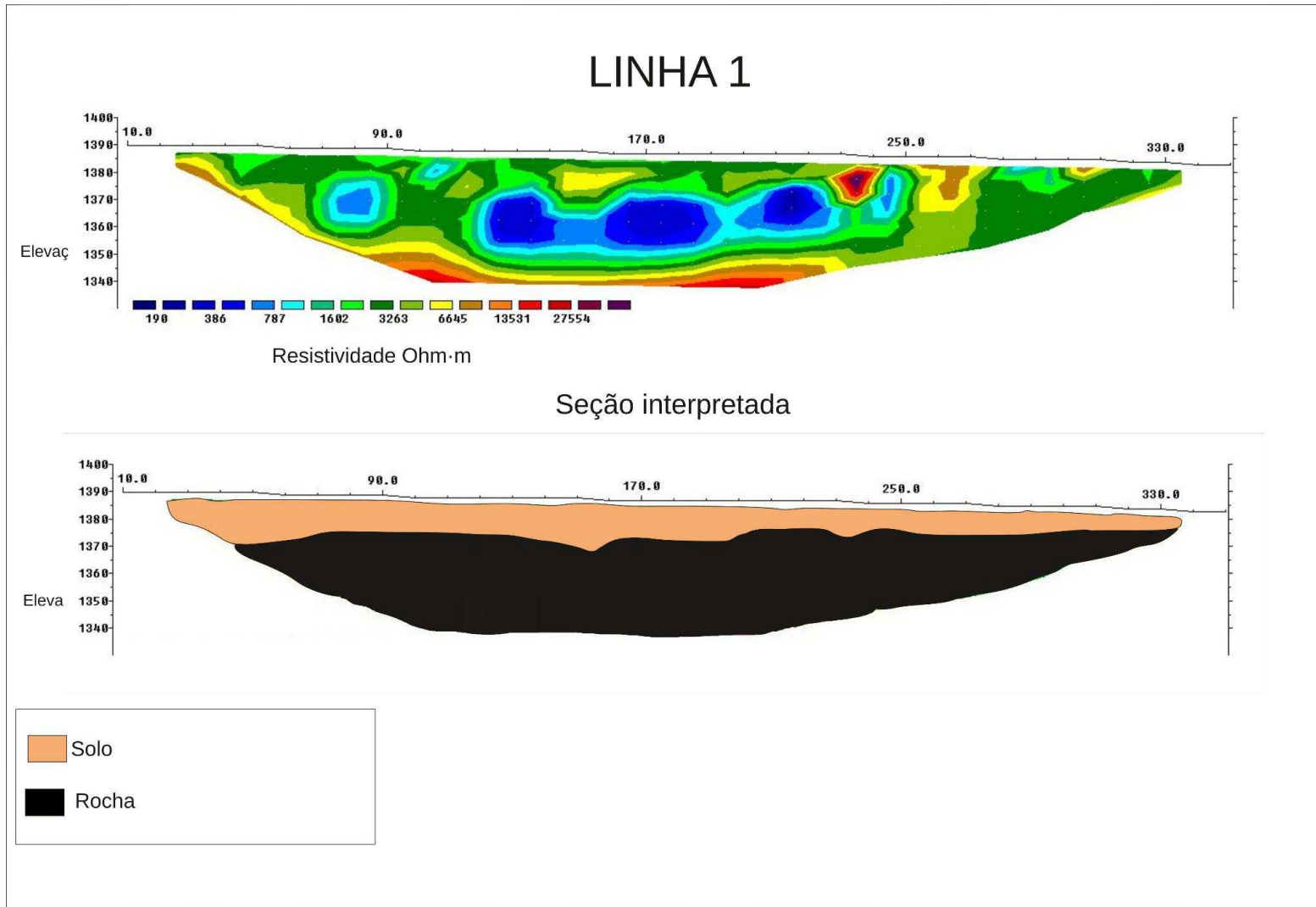
Fonte: Autora (2022).

5.2 Eletrorresistividade

Como descrito na literatura especializada, valores de resistividade inferiores a 20 Ohm.m representam possíveis plumas de contaminação no subsolo, assim evidenciando a percolação de chorume (SHIRAIWA et al., 2002). Nas seções de Eletrorresistividade também é possível localizar zonas saturadas, que se caracterizam com resistividades superiores a 20 Ohm.m e inferiores a 100 Ohm.m, nessas zonas os poros são preenchidos por água, permitindo observar esses valores de resistividade, uma vez que nessa água são encontrados minerais e possíveis contaminantes diluídos.

Conforme pode ser observado no perfil de Eletrorresistividade da linha 1, Figura 21, não são apresentadas regiões com contaminação, uma vez que não apresentam resistividades inferiores aos limites estabelecidos pela literatura especializada.

Figura 21 - Seção de Eletroresistividade na linha 1.

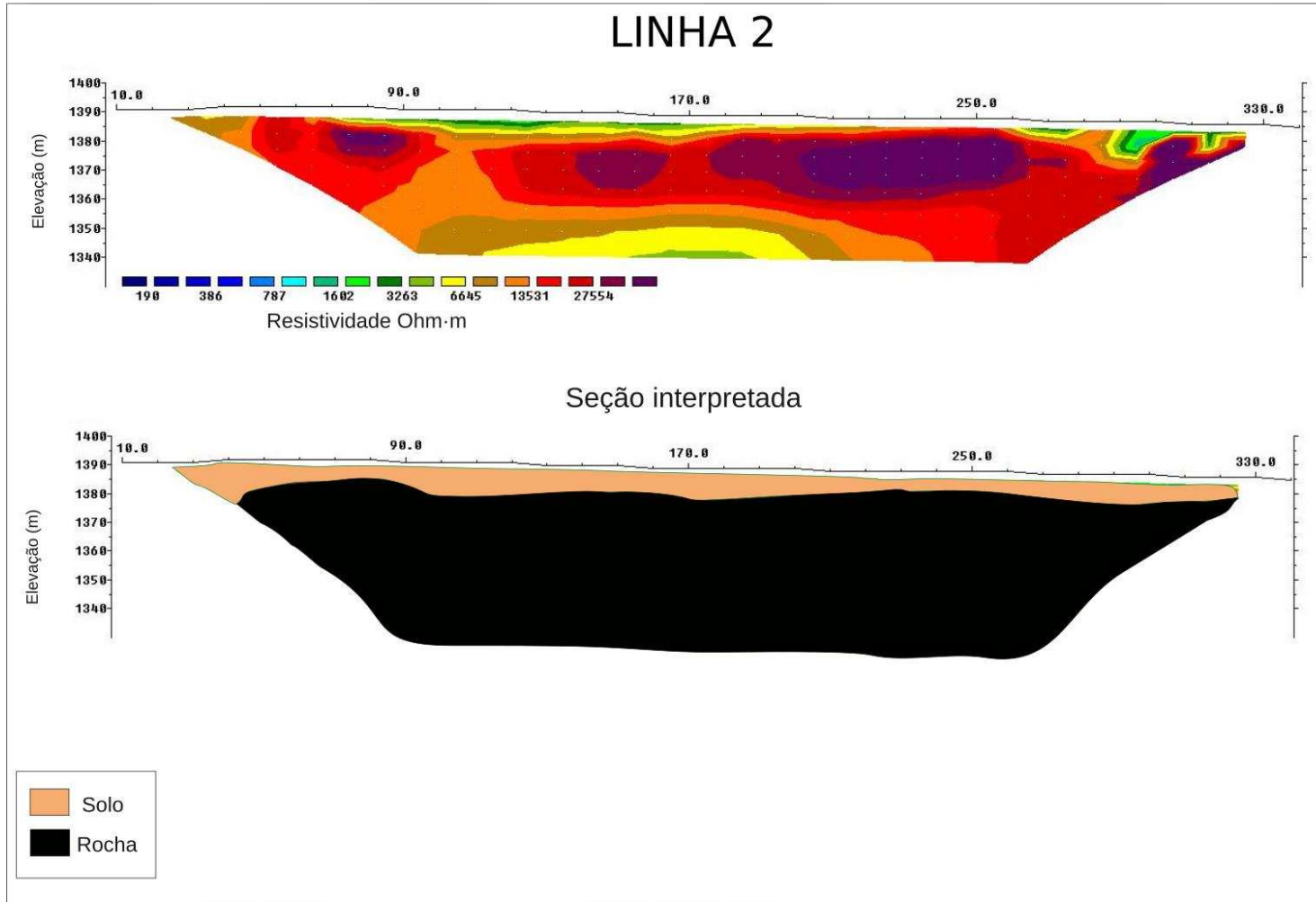


Fonte: Autora (2022).

A Figura 22 mostra a seção de Eletrorresistividade da linha 2. Nela, pode-se observar duas camadas distintas: a primeira, um solo entre 5 e 10 metros de espessura, com resistividade no intervalo de 1600 Ohm·m a 7000 Ohm·m; e na segunda camada, o embasamento rochoso, que compreende o restante da seção, com resistividade variando de 8000 Ohm·m a 30000 Ohm·m. Como a seção de Eletrorresistividade da linha 2 foi coletada afastada do aterro irregular, não foi observado nenhum contaminante, sendo a seção de *background*.

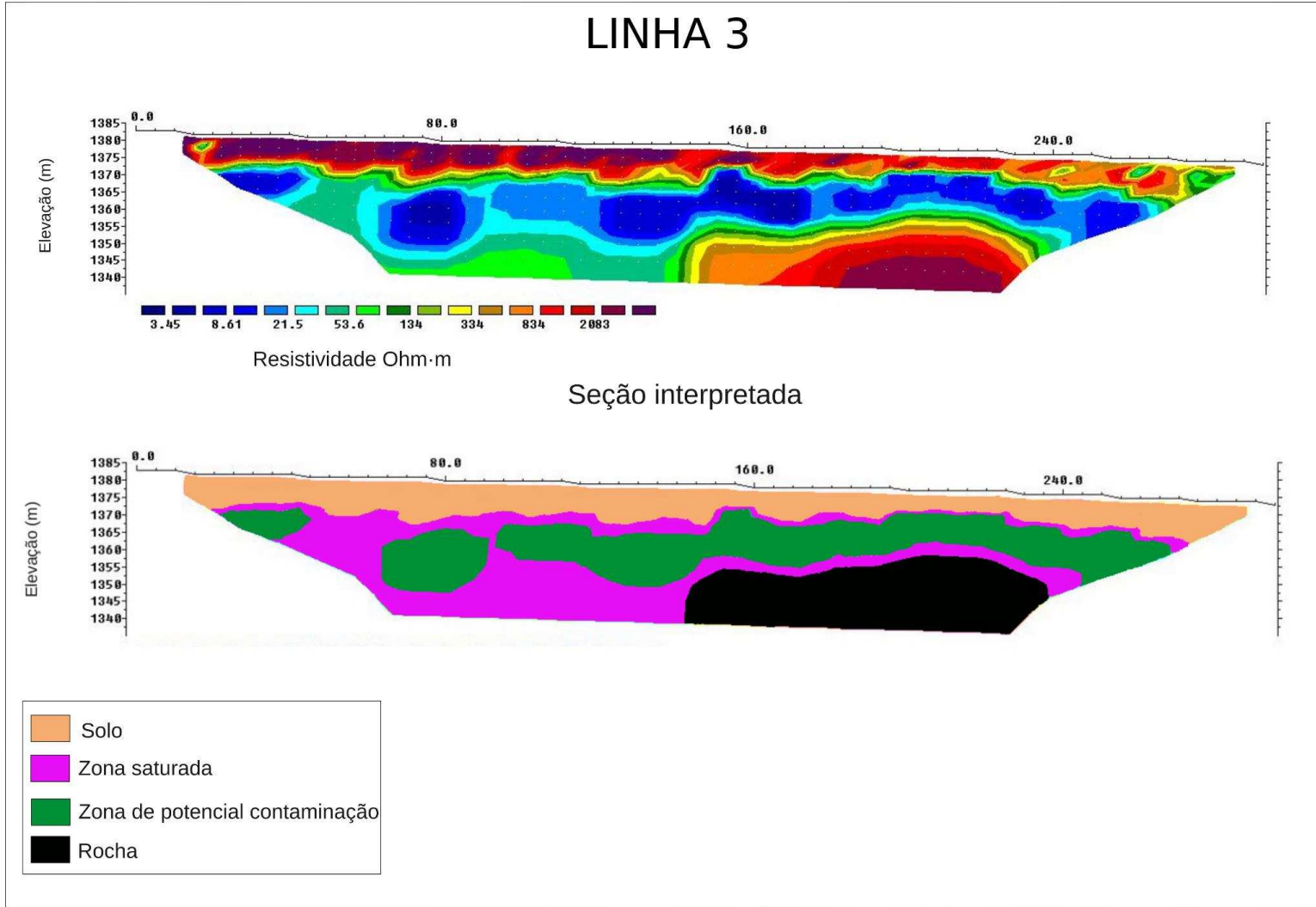
Ao avaliar o perfil de Eletrorresistividade da linha 3, Figura 23, foram encontradas regiões que apresentam resistividades inferiores aos limites estabelecidos por SHIRAIWA et al. (2002), assim sendo potenciais plumas de contaminação. Essas regiões apresentam tons de azul e representadas pela cor verde na seção interpretada da Figura 23. Entre a camada de solo, caracterizada por altas resistividades, superiores a 900 Ohms·m, e o embasamento rochoso é possível verificar uma zona saturada, com resistividade entre 20 e 100 Ohm·m, essa região foi destacada na seção interpretada pela cor roxa (Figura 23).

Figura 22 - Seção de Eletrorresistividade e interpretação na linha 2.



Fonte: Autora (2022).

Figura 23 - Seção de Eletrorresistividade e interpretação na linha 3.



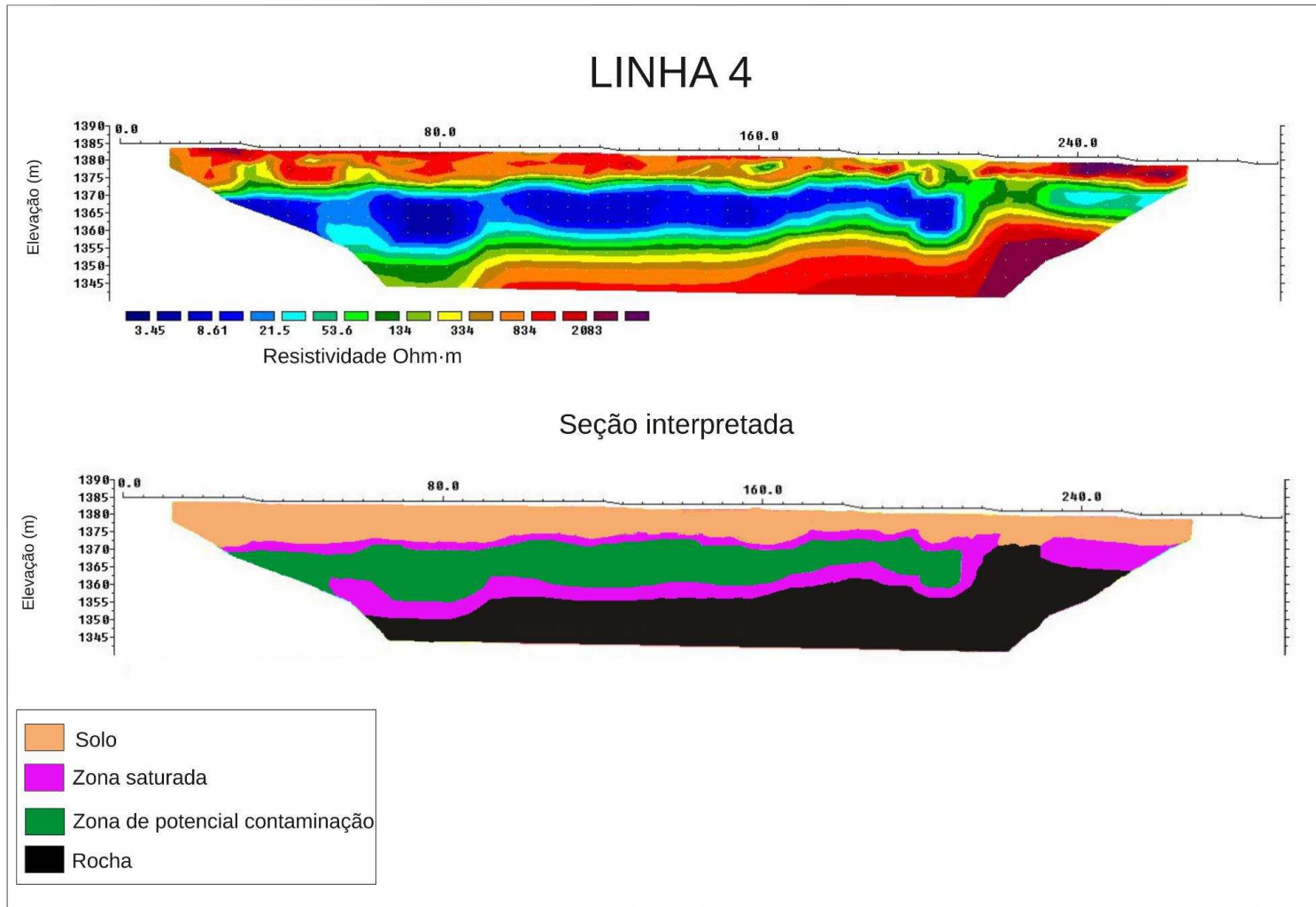
Fonte: Autora (2022).

Conforme pode ser observado no perfil de Eletrorresistividade da linha 4, Figura 24, são apresentadas quatro regiões distintas: o solo, com uma resistividade média acima de 800 Ohm·m, entre 10 e 15 metros de espessura; uma camada saturada, indicada pela cor roxa na seção interpretada, onde em seu interior é possível observar regiões com potencial contaminação da subsuperfície, uma vez que apresentam resistividades inferiores a 20 Ohm.m, que são apresentadas em tons de azul escuro na imagem; e por fim, o embasamento rochoso.

Analisando o perfil de Eletrorresistividade da linha 5, Figura 25, é possível observar regiões muito distintas, seguindo o mesmo padrão dos perfis anteriores, ou seja, um solo com resistividade acima de 800 Ohm·m e com espessura de 15 metros; a zona saturada, na qual se localizam as potenciais pluma de contaminação, apresentando resistividade inferiores a 20 Ohm.m, que são apresentadas em tons de azul escuro na imagem e se encontram nos marcos de 80 a 100 m, 125 a 180 m e 192 a 257 m; por fim, o embasamento rochoso.

A última linha levantada no projeto, a linha 6, Figura 26, apresenta as mesmas regiões descritas na análise das linhas anteriores, que são: o solo, o embasamento rochoso e a zona saturada, na qual é possível observar as potenciais plumas de contaminação, com resistividade inferior ao limite estabelecido pela literatura, que se encontram entre 145 a 160m e 165 a 263 m na linha 6.

Figura 24 - Seção de Eletrorresistividade e interpretação na linha 4.



Fonte: Autora (2022).

Figura 25 - Seção de Eletrorresistividade e interpretação na linha 5.

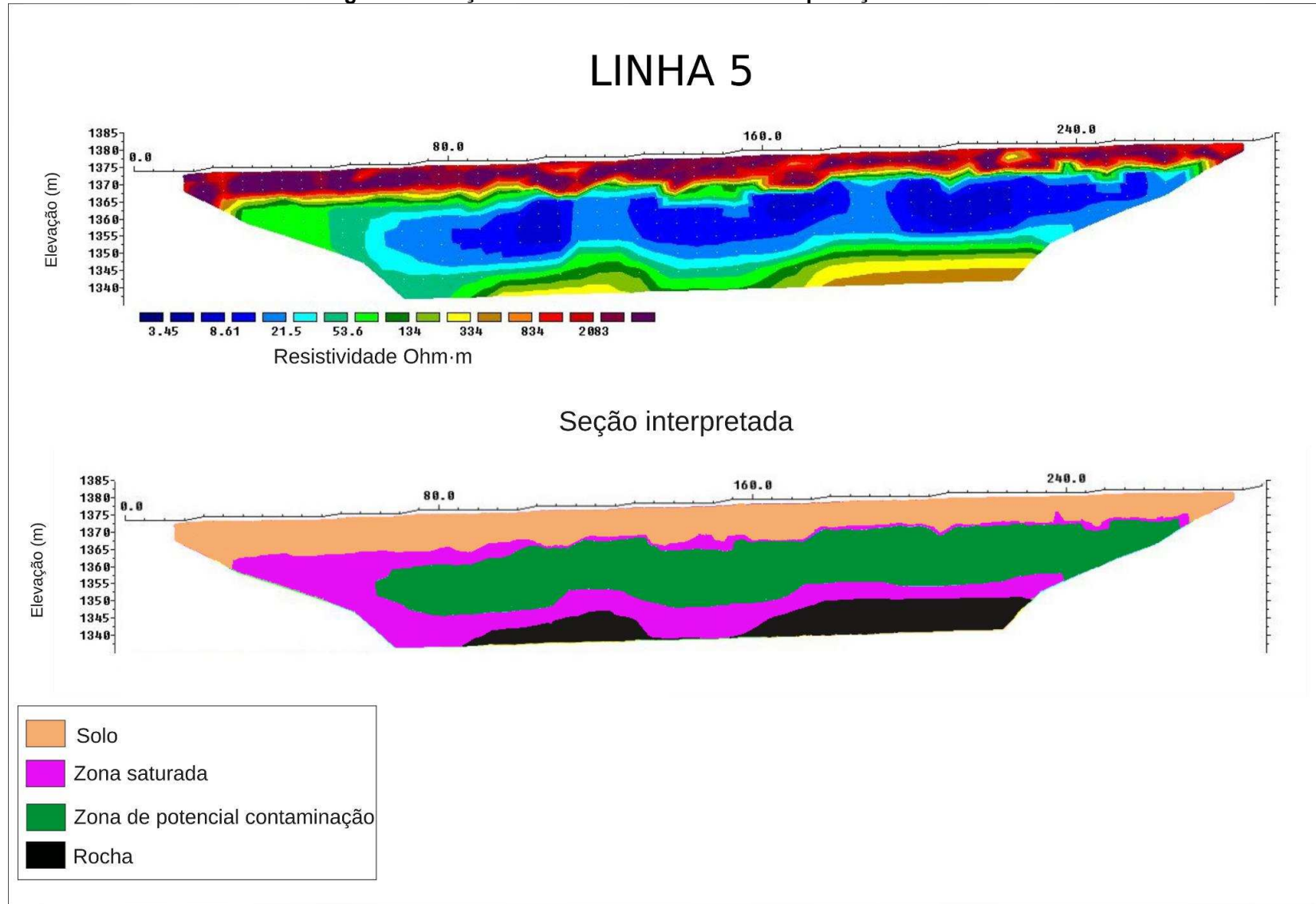
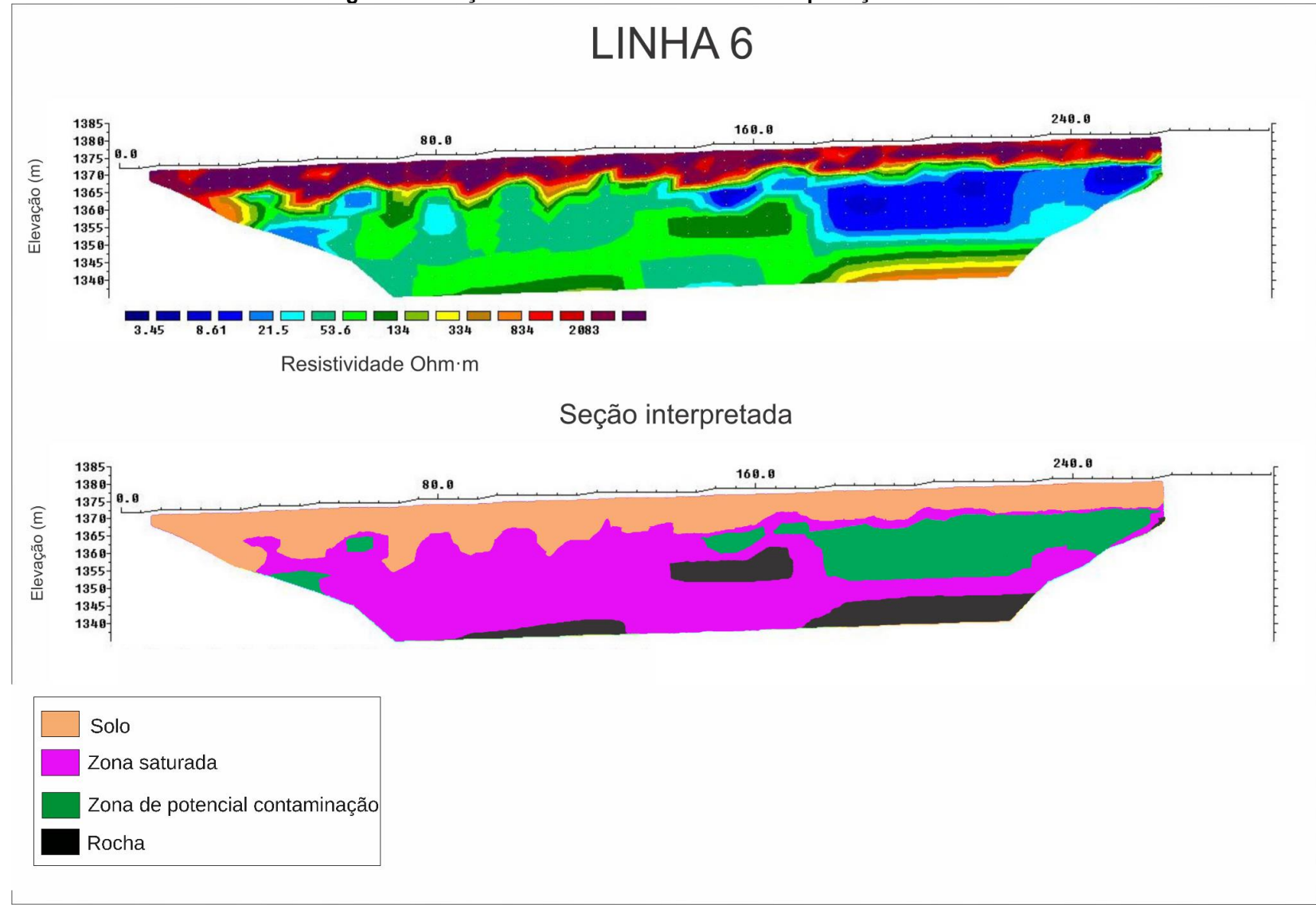


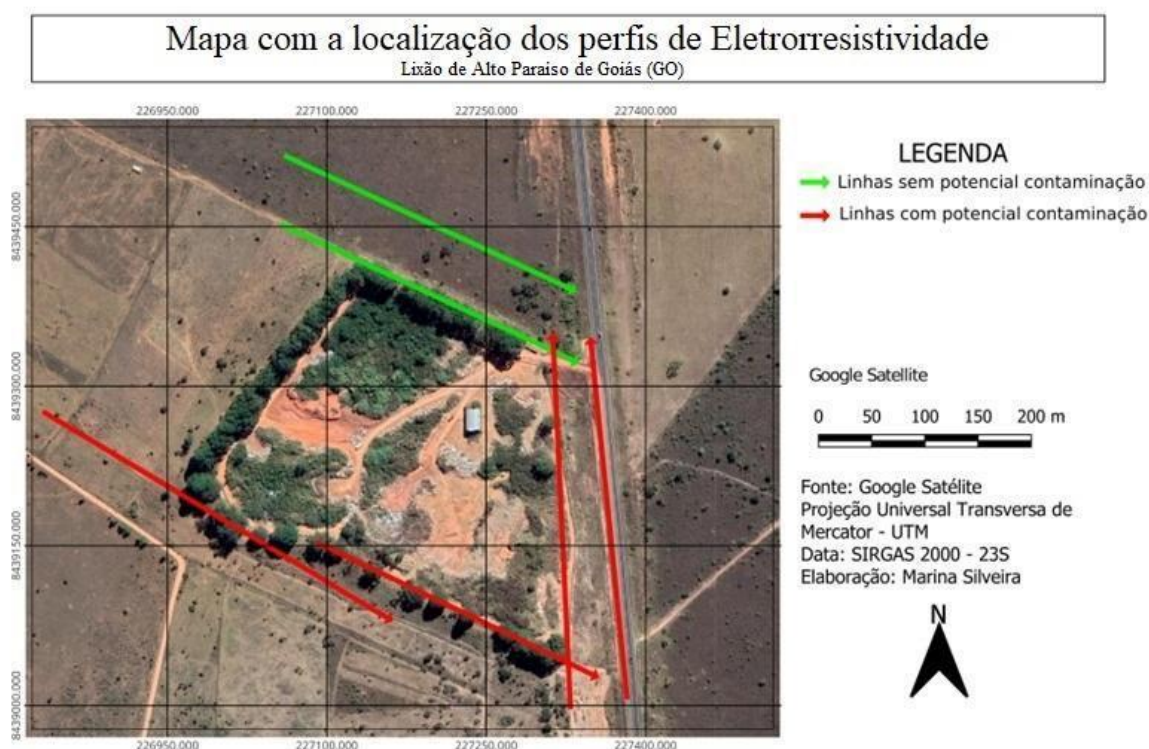
Figura 26 - Seção de Eletroresistividade e interpretação na linha 6.



Fonte: Autora (2022).

A partir dos resultados obtidos empregando a metodologia de Eletorresistividade foi possível observar potenciais plumas de contaminação nas faces sul e leste do Lixão de Alto Paraíso de Goiás, Figura 27, tanto na área interna quanto externa, destas faces. Permitindo concluir que o descarte dos RSU em valas sem impermeabilização, desrespeitando as normas, além de gerar a contaminação do solo e das águas subterrâneas, a partir da percolação do lixiviado, provoca a contaminação das áreas externas ao aterro irregular. O escoamento do chorume para a área externa do aterro irregular pode ser justificado pelo fluxo de escoamento encontrado nessa região, que ocorre no sentido Noroeste para Sudeste, como suposto no mapa hipsométrico, Figura 3.

Figura 27 - Mapa de localização das seções de Eletorresistividade, apontando as seções sem potencial contaminação e as seções com potencial contaminação.

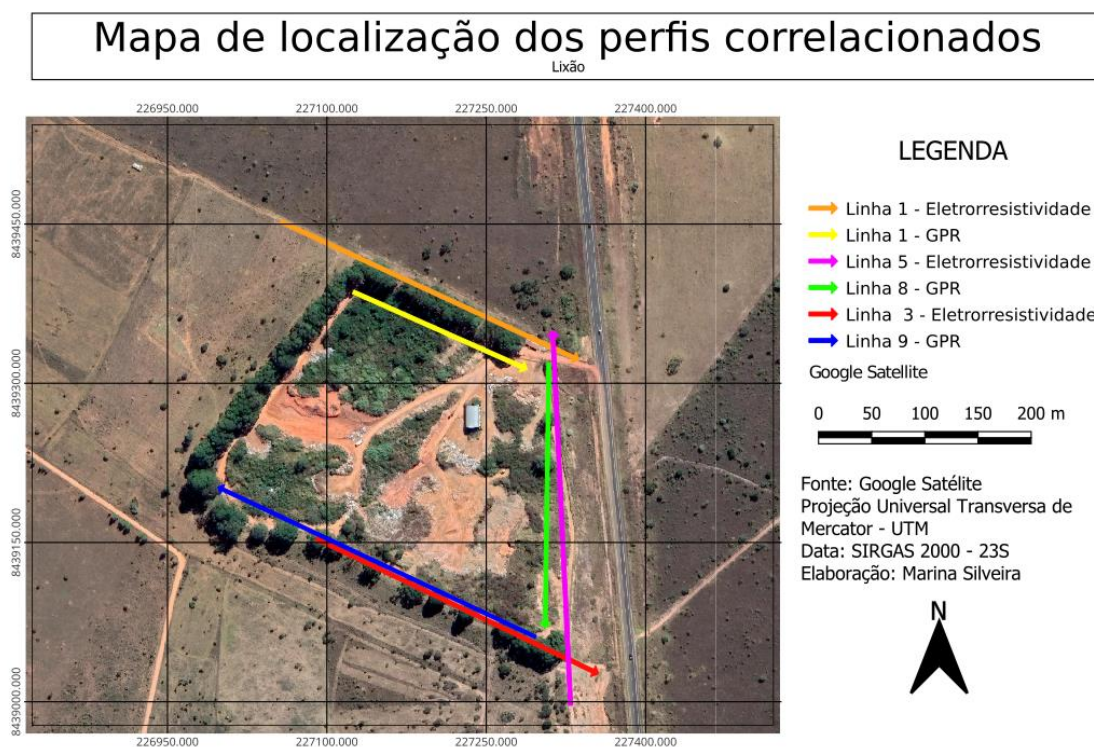


Fonte: Autora (2022).

5.3 Análise correlacionando os dados de GPR e Eletorresistividade

Para agregar uma maior veracidade aos resultados obtidos a partir da utilização de métodos geofísicos foi realizada a correlação entre os resultados obtidos pela aplicação do GPR e da Eletorresistividade para linhas próximas (Figura 28).

Figura 28 - Esquema com a localização e o sentido adotado para aquisição dos dados de Eletorresistividade e GPR na área interna e externa do Lixão de Alto Paraíso de Goiás, que foram correlacionadas.

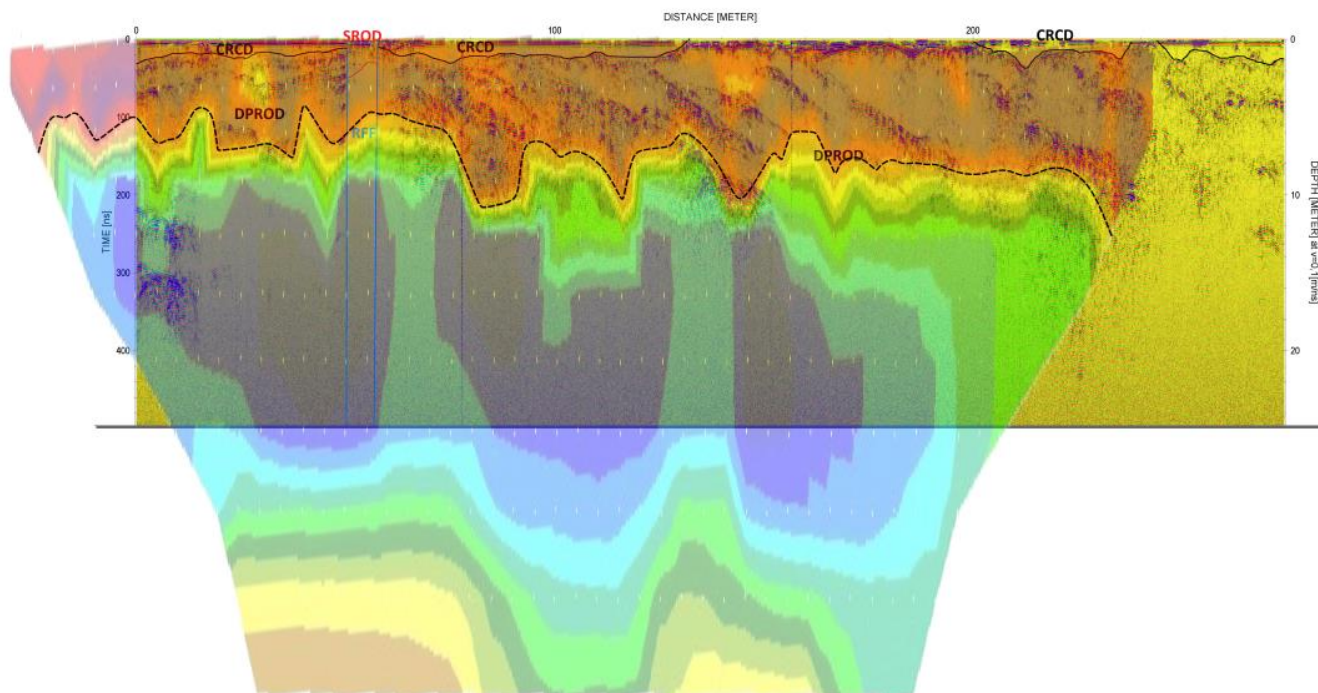


Fonte: Autora (2022).

Os resultados da linha 1, do GPR, podem ser correlacionados com os resultados da linha 1, da Eletorresistividade, representado a região externa da face norte do Lixão de Alto Paraíso de Goiás. Em ambas as análises não foi constatada a presença de contaminação, mas foi possível observar algumas características do solo da região.

Quando é analisada a face leste interna do aterro irregular é possível correlacionar a linha 8, do GPR, com a linha 5, da Eletorresistividade, ambos os resultados detectaram potenciais regiões de contaminação. Considerando que a coleta de dados foi realizada em sentidos opostos, a seção resultante da Eletorresistividade foi espelha e foi sobreposta ao perfil de GPR, Figura 26, o que permite visualizar de forma mais clara que o ponto da provável pluma detectada pelo GPR também foi detectado pela Eletorresistividade.

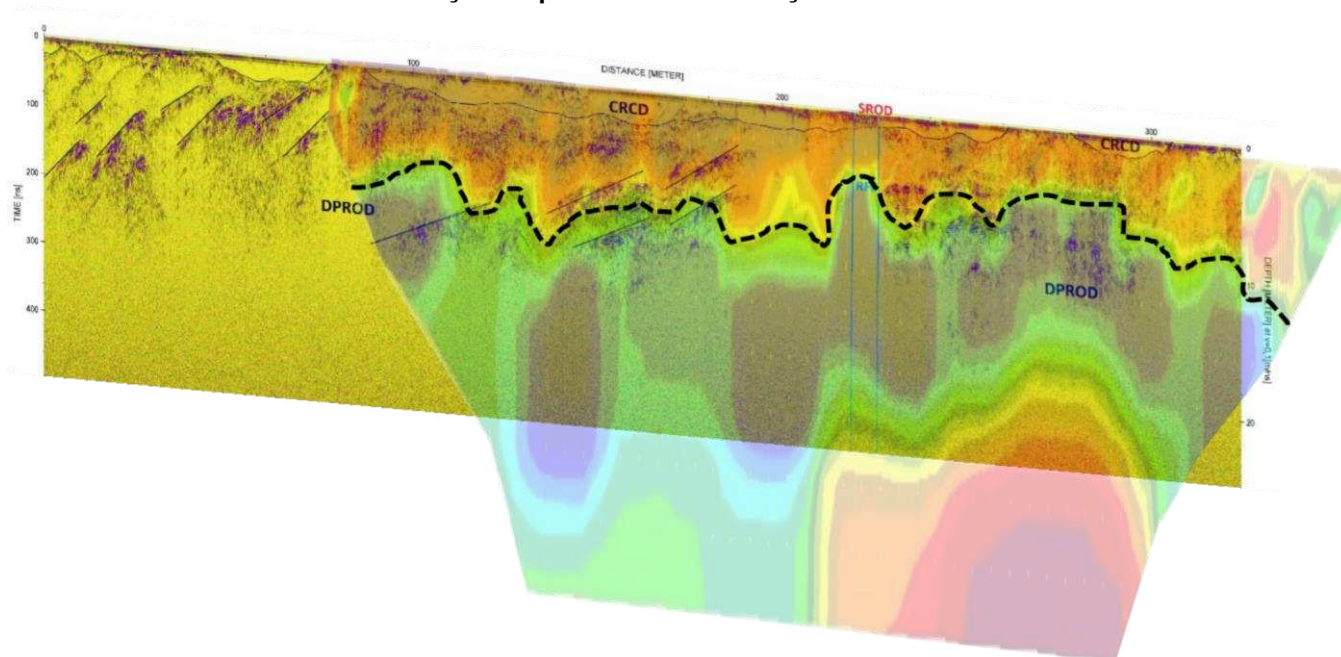
Figura 29 - Seção de Eletorresistividade na linha 5 sobreposta ao perfil da linha 8 de GPR, evidenciando a detecção da possível contaminação no mesmo local.



Fonte: Autora (2022).

Ao concatenar-se os resultados da Eletroresistividade, linha 3, com os do GPR, linhas 9, considerando que a coleta de dados foi realizada em sentidos opostos é possível verificar que ambos os métodos encontraram prováveis pontos de contaminação na face sul na parte interna do Lixão de Alto Paraíso de Goiás. E conforme é visto na Figura 27 ambos os métodos conseguiram localizar a mesma pluma de contaminação.

Figura 27 - Seção de Eletroresistividade na linha 3 sobreposta ao perfil da linha 9 de GPR, evidenciando a detecção da possível contaminação no mesmo local.



Fonte: Autora (2022).

Como para a coleta de dados não foi utilizado nenhuma metodologia para o armazenamento da localização geográfica das linhas, não é possível validar as correlações entre os resultados com precisão. Mas, como pode ser observado na análise comparativa, os resultados dos métodos geofísicos aplicados para busca de prováveis plumas de contaminação foram coerentes. Uma vez que, em áreas de atenuação do sinal, GPR, também foram observadas resistividades inferiores aos valores estabelecidos na literatura especializada, Eletroresistividade, e esses comportamentos são associados a potencial contaminação. É importante ressaltar que através da correlação também foi validado o comportamento dos resultados quando não é encontrada presença de contaminante subterrâneo.

6 CONCLUSÃO

Pode-se concluir, após aquisição de dados a partir da aplicação de métodos geofísicos, GPR e Eletorresistividade, que há uma correlação entre as regiões de atenuação do sinal do georadar e as baixas resistividades e as potenciais áreas de contaminações.

Os resultados obtidos expõem indícios que, na região subterrânea das bordas sul e leste do Lixão de Alto Paraíso de Goiás - GO, existem potenciais áreas de contaminação pela percolação de chorume tanto na área interna quanto externa do aterro irregular. Uma vez que, foram encontrados padrões com atenuação do sinal nos resultados do GPR e resistividades inferiores a 20 Ohm.m na Eletorresistividade nestes locais. Outro fato que corrobora com as potenciais contaminações se localizarem nas bordas sul e leste do aterro irregular é a observação da hipsometria desta região que indica que o sentido do escoamento ocorre do Nordeste para o Sudeste. Assim, demonstrando que a má gestão de destinação dos RSU pode causar potenciais problemas ambientais.

Destaca-se a aplicação de métodos geofísicos, GPR e Eletorresistividade, o que propiciou uma maior veracidade aos resultados obtidos. Visto que, os resultados obtidos em ambos os métodos evidenciaram potenciais contaminações na subsuperfície do aterro irregular na mesma região quando são comparados os resultados de linhas com posicionamento geográfico próximo. Assim, demonstrando a validade da aplicação combinada do GPR e da Eletorresistividade para estudos exploratórios que objetivem a busca por potenciais áreas de contaminação devido a percolação de chorume na subsuperfície.

Recomenda-se para trabalhos futuros neste local a utilização de métodos invasivos, como a perfuração de sondagem, nas áreas de potencial contaminação para a confirmação desses dados e verificação do posicionamento do lençol freático, assim avaliando se houve sua contaminação. Outro método invasivo que poderia ser aplicado seria a instalação de poços de monitoramento, os quais permitem a coleta de amostras de solos e água, assim ficando como sugestão para trabalhos futuros.

Outra melhoria sugerida seria a implantação de alguma forma de controle da entrada dos resíduos sólidos, uma vez que o descarte de resíduos no Lixão de Alto

Paraíso de Goiás - GO, em 2022, ainda ocorre sem nenhum tipo de controle do material ou do indivíduo que o deposita.

REFERÊNCIAS

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2019.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2011.

ALMEIDA, L. et. al. Hidrogeologia do estado de Goiás e Distrito Federal. Governo do Estado de Goiás. **Série Geologia e Mineração**. Nº 1. Superintendência de Geologia e Mineração, Estado de Goiás, 2006, 236p.

ALVES, K. L. **Caracterização geoeétrica do lixão municipal de Pirenópolis, Goiás**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

AMORIM, A. P. et al. Lixão municipal: abordagem de uma problemática ambiental na cidade do Rio Grande-RS. **AMBIENTE & EDUCAÇÃO**, v. 15. n. 1, p. 159-178 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004: Resíduos sólidos- Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT. 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT. 2004b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.935: Aplicação de Métodos Geofísicos em Investigações ambientais**. Rio de Janeiro: ABNT. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8.419: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT. 1992.

BORGES, W *et al.* Georadar as a reconnaissance tool in evaluating subsoil contamination by urban waste. **Remote Sensing**, v 14, 2022.

BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUTTI FILHO, W. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de

disposição de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, p. 367-374, 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Brasília: Casa Civil, 2010.
Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 20 mar. 2022.

BRASIL. **Roadmap for the closure of dumps - the most polluted places in the world. International Solid Waste Association (ISWA)/Association of Public Cleaning and Special Waste Companies (ABRELPE)**. São Paulo, 2017.
Disponível em: www.abrelpe.org.br. Acesso em: 18 mar. 2022.

CAMPOS, J. E. G. *et al.* Folha SD.23-Y-A-I -Alto Paraíso de Goiás, Geology Program of Brazil, Geological Chart - Scale 1:100.000, **Geological Survey of Brazil** – CPRM, 2013.

CAVALCANTI, M. M. *et al.* Levantamento geofísico (eletrorresistividade) nos limites do aterro controlado do Jokey Clube, Vila Estrutural, Brasília–DF. **Geosciences= Geociências**, v. 33, n. 2, p. 298-313, 2014.

CAVALCANTI, M. M.. **Aplicação de métodos geoeletricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do aterro controlado do Jokey Clube de Brasília**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

COSTA, M. F.. **O lixão de Posse-GO: impactos ambientais e a questão do lixo**. 2013. Monografia (Licenciatura) - Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

DAVIS, M. L.; MASTEN, S. J. **Princípios de engenharia ambiental**. 3. ed. McGraw Hill Brasil, 2016.

DE OLIVEIRA, B. *et al.* Utilização da ferramenta Ground Penetrating Radar (GPR) e da modelagem 3-D para a detecção da interface de interação água doce/salgada da Vila do Bonifácio, Praia de Ajuruteua (Bragança-PA). **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 14185-14224, 2021.

ELIS V. R.; ZUQUETTE L. V. Determinação da estrutura do aterro sanitário de Ribeirão Preto-SP através de métodos geoeletricos. **Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica**, v. 1, São Paulo - SP, p. 417-420, 2002.

GALLAS J. D. F. *et al.* Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 1, p. 51-59, 2005.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística)). **In: Cidades e Estados: Alto Paraíso de Goiás**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/go/alto-paraíso-de-goias.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.

JARENTCHUK J. **Aplicação do georradar (GPR) na prospecção eletromagnética de solos: potencialidades e limitações**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de

Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 142 p., 2013.

JUNQUEIRA, BRC. **Levantamento de dados geofísicos para investigação de contaminação por chorume na área do Aterro Controlado do Município de Caldas Novas – GO.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99p., 2022.

LAUREANO, A. T e SHIRAIWA, S. Ensaios Geofísicos no Aterro Sanitário de Cuiabá – MT. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26(2), p. 173-180, 2008

LIMA R. S. **Otimização de perfis de reflexão GPR sobre manilha de concreto e tubulações de PVC instaladas no sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP.** Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil 130p., 2006.

MACHADO, G. B. Portal Resíduos Sólidos. **Biodigestores– Princípio, tipos e viabilidade econômica.** Disponível em: <http://www.portalresiduossolidos.com/biodigestores-principio-tipos-eviabilidade-economica/>. Acesso em: 20 jun de2022.

MEJU M. A. 2000. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. **Journal of Applied Geophysics**, v. 44, p. 115-150.

MONTEIRO, R. T. R. *et al.* Lixiviação e contaminação das águas do rio Corumbataí por herbicidas. In: **Embrapa Meio Ambiente-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 26.; CONGRESO DE LA ASOCIACIÓN LATINO-AMERICANA DE MALEZAS, 18., 2008, Ouro Preto. A ciência das plantas daninhas na sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Ouro Preto: SBCPD, 2008. p. 181-192., 2008.

MOURA, HP e MALAGUTTI FILHO, W. 2003. Método de eletrorresistividade e de polarização induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro – SP. **Geociências**, São Paulo, UNESP, V.22, N. Especial, p. 129-139. 2003.

NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-science reviews**, v. 66, n. 3-4, p. 261-330, 2004.

OLIVEIRA JR **Contribuição do tratamento de resíduos sólidos em Alto Paraíso de Goiás ao projeto de cidade sustentável.** Monografia (Especialização) - Pós-Graduação em Direito Ambiental, Unisul, Santa Catarina, Brasil, 30p, 2017.

ORTEGA, R. A. **Localização e delineamento de pluma de contaminação por hidrocarbonetos através dos métodos GPR e tomografia elétrica.** Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil 115p., 2006.

PFEIFFER S. C. et al. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Goiás.** Funape/UFG, 502p., 2017.

PIRES, D. *et al.* Estudo ambiental do lixão urbano da cidade de Bragança (Pará) aplicando o radar de penetração no solo (GPR). **VI Simpósio Brasileiro de Geofísica**, 2014, Porto Alegre, 2014.

PIRES, D. M. B.; OLIVA, P. C. Avaliação da contaminação da subsuperfície de um lixão a céu aberto no município de Bragança (Pará, Brasil). **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 213-226, 2020.

REIS, G. C.. Investigação de resistividade elétrica nos limites do Aterro Controlado de Alto Paraíso- GO. **VII Simpósio Brasileiro de Geofísica**, 2016, Ouro Preto, 2016.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. 1. Ed1 Chichester, England: John Wiley & Sons, 2011.

RODRIGUES, F. A. Frederico Araújo Rodrigues - Geógrafo. **Mapa Altimétrico de Alto Paraíso - GO**. 17 nov. 2012. Disponível em: <http://fredericoarageo.blogspot.com/2012/11/mapa-altimetrico-de-alto-paraíso-go.html>. Acesso em: 2 dez. 2022.

SANTOS, F. M. **Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação de águas subterrâneas no lixão de Cuiabá-MT**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 101p., 2005.

SHIRAIWA S. *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.

SOARES, M. A. **Métodos geofísicos eletrorresistividade e eletromagnetismo para a avaliação de plumas de contaminação: estudos de caso e introdução aos métodos**. 2019. Monografia (Especialista). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

TCHOBANOGLIOUS, G. & KREITH, F. **Handbook of Solid Waste Management**. 2ª ed.. McGraw Hill Professional, 2002.

VODYANITSKII YN. Processos bioquímicos em solo e águas subterrâneas contaminados por lixiviados de terras municipais (Mini revisão). **Annals of Agrarian Science**, 14(3): 249–256, 2016.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Bookman, 2001

ZANON, T. V. B. **Avaliação da contaminação de um solo laterítico por lixiviado de aterro sanitário através de ensaios de laboratório e de retroanálise de campo**. 2013. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.