

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**

PATRÍCIA SOUZA FERREIRA

Estudo geofísico do Aterro Sanitário de Monte Carmelo (MG)

Monte Carmelo, MG

Abril/2025

Estudo geofísico do Aterro Sanitário de Monte Carmelo (MG)

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de graduação em
Geologia da Universidade Federal de
Uberlândia, como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Emerson
Rodrigo Almeida

Monte Carmelo, MG

Abril/2025

PATRÍCIA SOUZA FERREIRA

Estudo geofísico do Aterro Sanitário de Monte Carmelo (MG)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de graduação em Geologia da
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Geologia.

Banca de Avaliação

Prof. Dr. Emerson Rodrigo Almeida (UFU)
Orientador

Prof. Dr. Fabrício Aníbal Corradini (UFTM)
Membro da Banca

Prof. Dr. Marco Antônio Couto Júnior (USP)
Membro da Banca

AGRADECIMENTOS

O tempo em que fiz minha graduação foi de muito aprendizado e desafios, assim como é a vida por este motivo, agora que estou encerrando esse ciclo gostaria de agradecer a todos que direto e indiretamente fizeram parte dessa fase da minha vida que foi muito importante, conheci pessoas maravilhosas e boas que me deram muito apoio, entre eles Robson, Elaine, Tatiana, Luís, Bruno, Junior, Leonardo, Iara, Maíra, Roberta, Guilherme, André e tantos outros; em especial a um amigo que nunca vou esquecer, uma das melhores pessoas que conheci na faculdade, um anjo bom demais pra permanecer neste mundo Gustavo Chaves (*In memoriam*).

Gostaria de agradecer também aos meus professores pela paciência e dedicação, são mensageiros de conhecimento, possuem a mais bela e importante profissão do mundo. Principalmente ao meu orientador professor Emerson Almeida, meus sinceros agradecimentos por me ajudar na conclusão do meu curso.

Também quero dedicar a minha graduação em Geologia: a minha mãe Elisa de Fátima, meu único irmão David Júnior (*In memoriam*), minha vó, dona Rita e principalmente as minhas duas filhas que são uma luz na minha vida me guiando ao caminho do conhecimento e bondade: Letícia e Luciana, obrigada filhas pelo apoio.

À Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) na figura do Prof. Dr. Fabrício Aníbal Corradini, por ter emprestado o instrumento para aquisição dos dados, sem o qual este trabalho não teria sido possível.

Enfim, gostaria de agradecer a equipe do DMAE – Monte Carmelo que permitiu o acesso à área de estudo e a informações para a conclusão deste trabalho.

“Apesar das nossas limitações e fraquezas, nós humanos podemos alcançar a
grandezza”
Carl Sagan.

RESUMO

O presente estudo aborda a aplicação do método geofísico de Eletrorresistividade (ER) para a investigação da subsuperfície no Aterro Municipal de Monte Carmelo (MG). A disposição de resíduos sólidos pode levar à contaminação dos solos e de águas superficiais e subterrâneas por agentes químicos, como o chorume, caso essa atividade seja realizada de forma inadequada. Historicamente, o método de ER tem se mostrado uma ferramenta relevante para a avaliação e monitoramento das condições ambientais em lixões e aterros sanitários. Por ser um método de investigação relativamente simples e de baixo custo, a ER é útil para identificar anomalias de maior condutividade, que podem estar relacionadas a maiores concentrações de chorume no solo, permitindo assim a identificação de possíveis plumas de contaminação na subsuperfície. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é localizar prováveis plumas de contaminação e, caso existam, avaliar sua extensão na área de estudo. Foram realizados três levantamentos 2D, e os dados foram analisados utilizando o software Res2DInv. Muitas anomalias de baixa resistividade foram observadas, sugerindo a existência de plumas de contaminação, sendo uma delas localizada próxima à lagoa de chorume. No entanto, os resultados estão sujeitos a interferências de alta resistência de contato para o fluxo de corrente elétrica do equipamento para o solo, uma vez que, em algumas partes, a camada superficial é composta por fragmentos de telhas, aumentando significativamente a resistência de contato. Anomalias profundas de alta resistividade foram interpretadas como uma resposta à presença de blocos graníticos na subsuperfície, considerando a predominância dessa litologia em todo o local. Espera-se que os dados e análises apresentados sirvam como um estudo-piloto para futuros esforços de monitoramento na área contaminada, constituindo assim uma ferramenta auxiliar para a gestão do aterro pelas autoridades responsáveis.

Palavras-chave: Levantamento elétrico, Resíduos Sólidos, Aterro, Contaminação.

ABSTRACT

The present study addresses the application of the geophysical method of Electroresistivity (ER) for subsurface survey at the Municipal Landfill of Monte Carmelo (MG). The deposition of solid waste can lead to the contamination of soils and of both surface and groundwater by chemical agents, such as leachate, if such activity is carried out inadequately. Historically, the ER method has been proven to be a significant tool for evaluating and monitoring environmental conditions in open dumps and sanitary landfills. As a relatively simple and cost-effective method of investigation, ER is useful for identifying higher-conductivity anomalies which may be related to higher concentrations of leachate within the soil, thus allowing the identification of potential contamination plumes in the subsurface. In this context, the objective of this study is to locate probable contamination plumes and, if they are present, to evaluate their extension within the study area. Three 2D surveys were carried out, and the data were analysed using Res2DInv. Many low-resistivity anomalies were observed, suggesting the existence of contamination plumes, one of which is located next to the leachate lagoon. However, the results are subject to high contact resistance interference for the electric current flow from the instrument to the soil, given that at some parts the shallower layer is composed by a layer of broken tiles, thus significantly increasing the contact resistance. Deeper high-resistivity anomalies were interpreted as a response to the presence of granitic boulders in the subsurface, considering the predominance of this lithology throughout the site. The data and analyses presented are expected to serve as a pilot study for future monitoring efforts in the contaminated area, thus constituting an auxiliary tool for the management of the landfill by the responsible authorities.

Keywords: Electrical survey, Solid Waste, Landfill, Contamination.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1.	Resíduos sólidos	11
1.2.	Depósito em Aterro Sanitário	13
1.3.	Contaminação em aterros sanitários	13
1.4.	Localização e Vias de Acesso	14
1.5.	Justificativa	15
1.6.	Caracterização geral da área	16
1.6.1.	Aterro Sanitário de Monte Carmelo	16
1.6.2.	Aspectos fisiográficos do Aterro de Monte Carmelo	20
2.	OBJETIVOS	21
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1.	Fase Preliminar	22
3.1.1.	Levantamento Bibliográfico	22
3.1.2.	Elaboração dos Mapas	22
3.2.	Fase de Campo	23
3.1.	Resistividade Elétrica	24
3.2.	Método da Eletrorresistividade	26
3.3.	Caminhamento Elétrico	28
3.2.1.	Instrumentação	33
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	34
5.	GEOLOGIA REGIONAL	34
5.1.	Faixa Brasília	34
5.2.	Complexo Monte Carmelo	36
6.	RESULTADOS	40
6.1.	CE1	40
6.2.	CE2	43
6.3.	CE3	45
7.	DISCUSSÃO	47
8.	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	14
Figura 2 - Aterro Sanitário de Monte Carmelo em imagem de satélite.....	15
Figura 3 - Rede de chaminés por onde são exalados os gases na plataforma 2, através do sistema de drenagem interna do aterro.	16
Figura 4 - Lagoas de chorume no aterro.....	17
Figura 5 : Cacos de telhas usados nos taludes para oferecer maior estabilidade à estrutura....	18
Figura 6 - Plano de alteamento do Aterro Sanitário de Monte Carmelo. Os números de 1 a 4 representam o alteamento progressivo esperado no aterro.	19
Figura 7 - Gráfico demostrando o percentual dos recicláveis.	19
Figura 8 - Mapa de declividade da área de estudo.	20
Figura 9 - A. e B. Fotografia de trincheiras realizadas pelo maquinário destacando a profundidade desse solo e seus respectivos horizontes.	21
Figura 10 - Fotografia área do Aterro Sanitário de Monte Carmelo.	23
Figura 11 - Valores aproximados de resistividade em ($\Omega \cdot m$) de alguns materiais geológicos.	25
Figura 12 - Classificação dos métodos geoelétricos galvânicos.	27
Figura 13 - Mapa de satélite do aterro sanitário de Monte Carmelo, destacando todos os perfis realizados, as lagoas de chorume (localizadas ao lado do Perfil 1) e a localização do poço 1.31	
Figura 14 - Foto da Plataforma 2.....	31
Figura 15 – A. Local de aquisição do perfil 1 realizada na estrada a jusante a plataforma 1 e a jusante das lagoas de chorume. B. Lagoa Anaeróbica e Lagoa Aeróbica. C. Ponto de aquisição do perfil 2 realizado na estrada, a jusante da plataforma 2. D. Equipamento usado na aquisição de dados. E. Local de aquisição do perfil 3 realizado na estrada de acesso sobre a plataforma 2.	33
Figura 16 - Resistivímetro X5Xtal Control.	34
Figura 17 - Mapa estrutural da Faixa de Dobramentos Brasília.....	35
Figura 18 - Mapa geológico da região de Monte Carmelo.....	36
Figura 19 - Mapa geológico da área de estudo.....	38
Figura 20 - Granitoides do Complexo Monte Carmelo com foliação acebolada.	39
Figura 21 - Bloco de granitoide residual.	40
Figura 22 - Seção de eletrorresistividade das proximidades das lagoas de chorume e modelo geológico/geofísico elaborado a partir da correlação entre dados de resistividade elétrica. O retângulo preto indica a posição das lagoas de chorume no Aterro Sanitário de Monte Carmelo.	42

1. INTRODUÇÃO

O aumento das atividades econômicas em conjunto com o crescimento urbano e populacional descompensa a natureza como um todo, devido à aceleração da produção industrial, o que leva a um consumo maior de recursos naturais desequilibrando a capacidade natural de reposição destes (PORTILHO, 2005). Consequentemente, os resíduos gerados tornam-se um problema tendo em vista que necessitam de áreas específicas para o seu descarte, podendo acarretar problemas ambientais caso sejam depositados inadequadamente em lixões e aterros (GEORGES; GOMES, 2021).

Segundo a ABRELPE (2015), a degradação da natureza e a deficiência de armazenamento dos lixões estão associadas às emissões de resíduos tóxicos e à contaminação direta e indireta dos solos e da atmosfera, sobretudo pela liberação de agentes específicos, como POPs (Poluentes Orgânicos Persistentes), metais pesados e COVs (Compostos Orgânicos Voláteis). O cuidado com a sociedade depende das práticas adotadas para reverter essa situação e do tipo de resíduo que é depositado nos lixões, em conjunto com as condições sociais e ambientais do local.

Medidas paliativas existem desde a Constituição Federal de 1988, com a publicação da Lei nº 6.938 (Lei sobre crimes ambientais), na qual o Brasil tem metas a serem cumpridas, ações e instrumentos para uma Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) totalmente instituída (FERREIRA; SALES, 2016). Segundo dados do Ministério do Meio Ambiente (2022), o Brasil possui mais de 3000 lixões e a implementação pelo Governo Federal do programa Lixão Zero em abril de 2022, já encerrou mais de 800 lixões.

Os métodos de investigação não invasivos, que auxiliam tanto na identificação, quanto na caracterização de áreas que oferecem riscos, podem ser uma importante ferramenta na proteção da natureza (FIORE, 2017). A Geofísica vem se tornando uma das melhores ferramentas para interpretação do meio natural, sendo a principal para leitura de dados geológicos (BRAGA, 1997). Além disso, tem se mostrado relevante através dos vários métodos, sendo utilizada por empresas e instituições de ensino e pesquisa tendo como foco estudos associados a problemas ambientais (ELMOUINE, 2021), geotécnicos (GUIRELI, 2017), hidrogeológicos (MOREIRA; OLIVEIRA; SILVA, 2011) e mapeamentos geológicos (XIE, 2020). Isto é importante tendo em vista que esses métodos conseguem oferecer mecanismos para a caracterização da subsuperfície em grandes áreas, sem que ocorra interferência direta nas investigações (FACHIN, 2007).

A Geofísica consiste na aplicação dos princípios da Física no estudo da Geologia para avaliar variações verticais e laterais das propriedades físicas das rochas através de métodos que podem ser divididos de acordo com a natureza do fenômeno físico observado. Os métodos de fonte natural medem a variação dos campos naturais como por exemplo os campos magnético, gravitacional e eletromagnético devido às propriedades físicas das rochas, bem como o decaimento radioativo de alguns minerais. Por outro lado, os métodos de fonte controlada envolvem a geração de campos eletromagnéticos, elétricos e de ondas sísmicas por meio de equipamentos específicos. (KEAREY et al. 2009).

Trabalhos sobre prospecção usando estes métodos foram iniciados no século XX, de modo que vários pesquisadores contribuíram para desenvolver o método de eletrorresistividade. Ao mesmo tempo, nas “Escolas Francesa e Americana”, respectivamente, Conrad Schlumberger e Frank Werner introduziram o arranjo de quatro eletrodos nas medidas de resistividade de superfície (BORGES, 2007). Atualmente, o método de Eletrorresistividade é amplamente utilizado na Geotecnia (PÀDUA, 2019; CUTRIN, 1999), em investigação de águas subterrâneas (ELIS, 1999), em arqueologia (BROCHI, 2020), na localização de depósitos minerais e variações litológicas (WEST et al., 1983; BORGES, 2000), assim como na identificação de plumas de contaminação (BARROS et al., 2022; GALLAS, 2000; LAGO, 2004; ELIS, 1999) e no mapeamento geológico, entre outras aplicações (OLDENBUG, 2015).

O método consiste em medir os potenciais elétricos gerados no subsolo a partir de uma fonte elétrica controlada (MARESCOT, 2018). Em aplicações ambientais a diferença de potencial elétrico é considerada resultante de reações eletroquímicas ou eletrônicas na subsuperfície, causadas pela biodegradação dos contaminantes orgânicos infiltrados e que vão adquirir mais reações químicas devido a fatores como: a mistura e decomposição de materiais diferentes, temperatura e pressão aumentada. O último, no contexto dos aterros sanitários, ocorre devido ao peso da massa de lixo e da cobertura depositada (ATEKWANA; SLATER, 2009; FACHIN, 2012; GALLAS et al., 2010; NTARLAGIANNIS et al., 2007). Áreas em que este processo ocorre tendem a apresentar uma diferença de potencial na ordem de algumas dezenas de miliVolts (KEAREY; BROOKS; HILL, 2013).

A eletrorresistividade é particularmente útil na identificação de diferentes tipos de rochas e solos (CARRAZZA, 2016), na detecção de aquíferos e nascentes (NETO; SIQUEIRA, 2022) e na avaliação de contaminações (GALDEANO, 2016). A capacidade dos métodos geofísicos de fornecer informações sobre a estrutura geológica e as condições hidrogeológicas

os tornam ferramentas indispensáveis em projetos de exploração mineral, gestão de recursos hídricos e remediação de áreas contaminadas.

Os órgãos governamentais e órgãos de aplicação da lei são responsáveis pelo monitoramento dos riscos e de possíveis danos associados ao descarte de resíduos, já fazendo uso de novas estratégias de levantamento, considerando tanto métodos, quanto tecnologia (FIORE, 2017), contudo ainda é um problema a ser resolvido em outras localidades. Neste sentido, o objeto deste estudo envolve a avaliação voltada na identificação de possíveis plumas de contaminação no Aterro Sanitário de Monte Carmelo, que vem sendo utilizado, por meio de concessão, pelo DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgoto).

1.1. Resíduos sólidos

A definição de “resíduos sólidos” é descrita na literatura. A Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, direciona os setores privado e público do país para o gerenciamento do lixo. No Art. 3º, inciso XVI desta lei, está definido:

“Resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010, p.01).

Segundo a NBR 10.004/2010 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

“A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido” (ABNT, 2010, p.1).

A NBR 10.004/2010 classifica o lixo quanto sua origem, ao tipo de resíduos, à composição química e à periculosidade. Assim, serão divididos em:

“Classe I: perigosos são os resíduos que fazem mal para a saúde humana e para o meio ambiente. Eles precisam apresentar algumas características, como: periculosidade; inflamabilidade; corrosividade; reatividade, toxicidade; patogenicidade.

Classe II: não perigosos é dividida em não inertes e inertes.

Classe II A não perigosos - não inertes: são os resíduos que não apresentam periculosidade, porém não são inertes e eles podem ter alguns desses agentes em sua composição: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade na água.

Classe II B não perigosos- inertes: são aqueles que mesmo tendo contado com água, ainda permanecem inertes, muitos desses resíduos são recicláveis e não degradam rápido.” (ABNT, 2010, p.01).

O descarte dos resíduos sólidos pode ser na forma de compostagem, incineração, aterro sanitário, aterro controlado, reciclagem e de compostagem, entre outras. Mas nem todas são adequadas, podendo acarretar problemas à saúde humana, poluição dos solos e da água (CAVALCANTI et al., 2014).

A Lei 12.305/2010 no artigo 3º, inciso VIII apresenta como disposição final ambientalmente adequada:

“(...) disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e minimizar os impactos ambientais adversos” (BRASIL, 2010, p. 1).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sancionou o Decreto Federal nº11.043, de 13 de abril de 2022, que passa a valer no território nacional. Documento criado por meio de Acordo de Cooperação Técnica entre o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), atribui normas, estratégias, ações e metas com o objetivo de modernizar a gestão de resíduos sólidos no País, para serem colocados em prática os planos previstos na PNRS, conforme a Lei nº 12.305, de 2010. Esse plano reforça ainda a obrigação de encerramento de todos os lixões no País até 2024 (BRASIL, 2022).

1.2. Depósito em Aterro Sanitário

Além do lixão a céu aberto, dos aterros controlados, da reciclagem e da compostagem, outro método de disposição para os resíduos sólidos é o aterro sanitário, que é o meio de melhor destino aos resíduos urbanos, e que causa os mínimos danos à saúde pública e ao meio ambiente. Esta técnica consiste em compactar os resíduos no solo, colocando em camadas que posteriormente serão cobertas com terra ou outro material inerte, originando células de resíduos e o material de cobertura (CAVALCANTI et al., 2014).

De acordo com o MMA, foram elaboradas cartilhas sobre o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) aplicado a resíduos sólidos. No terceiro volume da cartilha, intitulado "Redução de emissões na disposição final", é especificado o conceito de aterro sanitário.

"O aterro sanitário é uma obra de engenharia projetada sob critérios técnicos, cuja finalidade é garantir a disposição dos resíduos sólidos urbanos sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente. É considerado uma das técnicas mais eficientes e seguras de destinação de resíduos sólidos, pois permite um controle eficiente e seguro do processo e quase sempre apresenta a melhor relação custo-benefício. Pode receber e acomodar vários tipos de resíduos, em diferentes quantidades, e é adaptável a qualquer tipo de comunidade, independentemente do tamanho." (MDL, 2007, p.13)

1.3. Contaminação em aterros sanitários

O tema da gestão de resíduos sólidos tornou-se cada vez mais relevante e requer uma discussão abrangente em toda a sociedade civil. Além disso, é crucial que sejam tomadas medidas em diversos níveis, incluindo ação individual, empresarial, institucional, governamental, não governamental, local, regional, nacional e internacional.

Uma abordagem amplamente adotada para a disposição de resíduos sólidos urbanos é o uso de aterros sanitários, que são considerados a opção mais econômica e ambientalmente segura. Esses aterros envolvem o uso de métodos de engenharia para confinar os resíduos em uma área mínima, reduzindo seu volume e cobrindo-os com uma camada de terra (GARCI-LASSO et al., 2010).

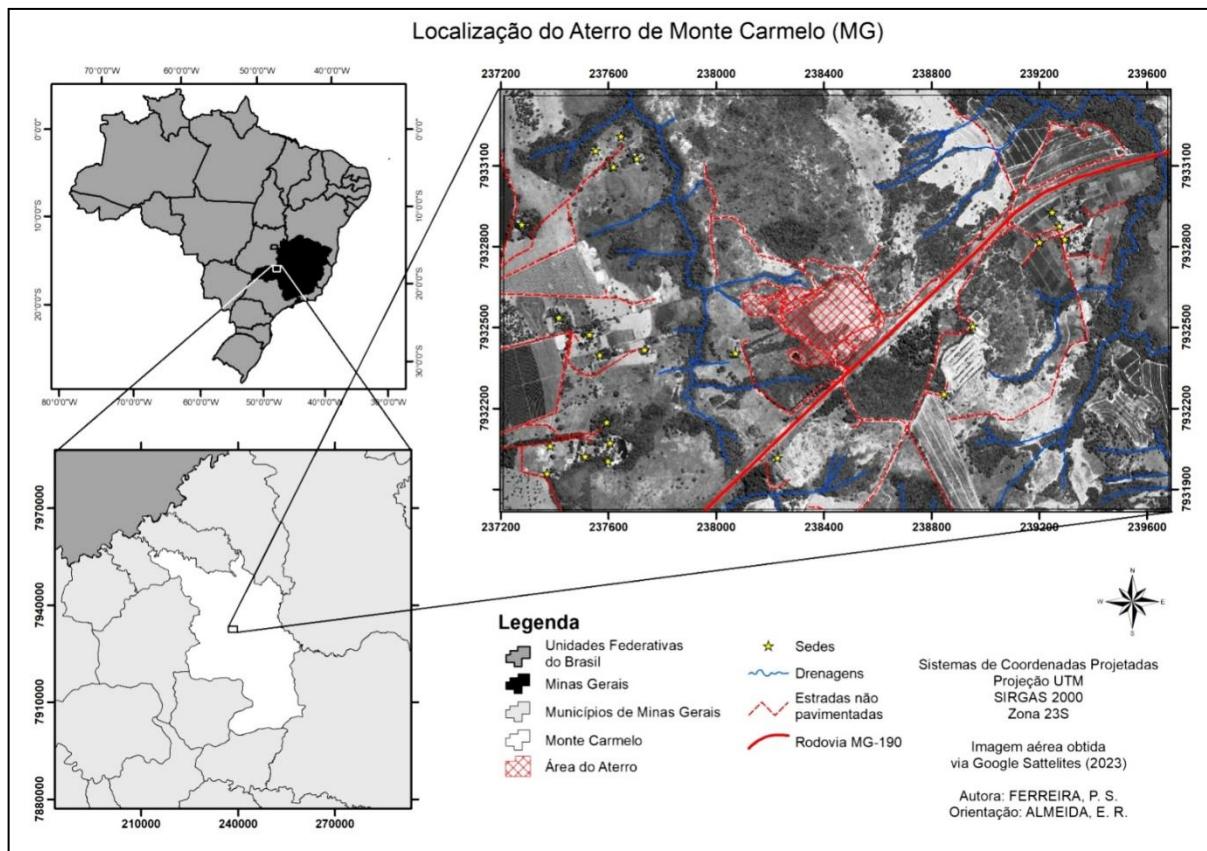
Segundo Kemerich et al (2014), o chorume é um líquido escuro que contém altas concentrações de compostos orgânicos e inorgânicos. Ele pode conter metais pesados, sólidos

suspensos e compostos orgânicos resultantes da degradação de substâncias metabolizadas, como carboidratos, proteínas e gorduras. Quando presente em determinados locais, pode contaminar o solo e os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, representando um risco ambiental.

1.4. Localização e Vias de Acesso

A área de estudo está localizada a 5,0 km da zona urbana de Monte Carmelo, Minas Gerais. O acesso se dá pela margem esquerda da rodovia MG-190 (Km 25,5), sentido Abadia dos Dourados (Figura 1). O aterro está localizado em uma área de 15,50 ha (Figura 2), com potencial de expansão na ordem de mais 3,30 ha até o final de sua vida útil (DEMAE, 2021).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 2 - Aterro Sanitário de Monte Carmelo em imagem de satélite. O polígono amarelo representa a área aproximada do aterro.



Fonte: Relatório DMAE (2021).

1.5. Justificativa

O Aterro Municipal de Monte Carmelo é o principal espaço para a disposição de resíduos sólidos do município de Monte Carmelo, Minas Gerais. O local está circundado por recursos hídricos, pedológicos e vegetais que podem ser afetados por eventuais contaminações do subsolo do aterro. A dinâmica dos resíduos oriundos da degradação do lixo urbano depende da correta instalação de estruturas subsuperficiais de contenção.

A contaminação do solo em aterros sanitários é um tema relevante e merece atenção especial das instituições públicas nacionais. A justificativa para realizar um trabalho sobre esse assunto reside na necessidade de se conhecer os impactos ambientais e os riscos à saúde pública decorrentes da contaminação do solo e águas nesses locais. Por este motivo, o método da eletrorresistividade, que é utilizado desde a década de 1920, continua sendo eficaz na solução desta problemática.

A contaminação do solo em aterros sanitários pode ter impactos negativos na qualidade da água subterrânea. Isto ocorre porque os contaminantes presentes no solo podem se infiltrar no material próximo à superfície e atingir os lençóis freáticos, comprometendo a disponibilidade de água potável e afetando ecossistemas aquáticos. Substâncias tóxicas presentes nos resíduos podem ser liberadas e posteriormente absorvidas pelas plantas cultivadas nas proximidades, ou até mesmo inaladas pela população próxima ao local. Isto pode levar a problemas de saúde, como doenças respiratórias, alergias e até mesmo o desenvolvimento de cânceres, devido ao consumo de alimentos contaminados.

Portanto, realizar um trabalho relacionado à investigação de eventual contaminação do solo na área proposta é de extrema importância para conscientizar a sociedade sobre os impactos ambientais e os riscos à saúde associados a essa problemática.

1.6. Caracterização geral da área

1.6.1. Aterro Sanitário de Monte Carmelo

Descrito pelo Relatório de Monitoramento Ambiental do DMAE, o maciço do aterro é assentado numa área plana de encosta, não existindo em seu interior nenhum talvegue. A drenagem das águas pluviais incididas a montante da projeção do último platô do aterro são coletadas por um sistema de canaletas que são instaladas à medida que se desenvolve o maciço e desviadas para jusante, minimizando a produção de chorume e resguardando a estabilidade do aterro (DMAE, 2021).

A infraestrutura básica de apoio do aterro sanitário é composta por sistemas de drenagem que permitem o desenvolvimento das atividades. Dentre essas estruturas, a drenagem interna do percolado é feita por um sistema tipo espinha de peixe, com uma seção hidráulica na linha principal, composta por um tubo coletor perfurado de polietileno Ø 50 mm envelopado, numa seção de 0,40 x 0,40 m de material granulado, as redes coletores secundárias são em seção retangular de 0,30 x 0,30 m, sem tubo coletor (DMAE, 2021). Esse sistema também envolve a retirada de gases no aterro (Figura 3).

Figura 3 - Rede de chaminés por onde são exalados os gases na plataforma 2, através do sistema de drenagem interna do aterro.



Fonte: Elaborado pela autora.

O efluente coletado é conduzido para o tratamento em duas lagoas em série, a anaeróbia e a facultativa. A seção hidráulica das lagoas é revestida com manta de polietileno. A lagoa anaeróbia tem um volume útil de 85,50 m³ e o armazenamento do efluente é de cinco dias. A lagoa facultativa, demonstrada na Figura 4, tem um volume útil de 906,30 m³ e o tempo de residência do efluente é de 53 dias (DMAE, 2021).

Figura 4 - Lagoas de chorume no aterro.



Fonte: Elaborado pela autora.

A presença de lagoas de chorume e da atuação de água fluvial fazem necessárias estruturas de captação bem estabelecidas. Por este motivo, o aterro detém, especificamente, redes de drenagem interna do percolado que é feita por um sistema tipo espinha de peixe, com seção drenante na linha principal, composta por um tubo coletor perfurado de polietileno Ø 80 mm envelopado, numa seção de 0,50 x 0,50 m. Para a sua proteção é utilizada uma camada de pedra de mão que o sobrepõe (DMAE, 2021).

A rede coletora secundária é uma seção retangular de 0,30 x 0,30 m, sem tubo coletor. Os drenos da base foram construídos quando da instalação do aterro e são expandidos conforme a evolução do maciço. Acima da camada de fragmentos de telha ainda é espalhado capim, objetivando manter a integridade física do tubo e evitar sua colmatação (DMAE, 2021).

Tanto os cacos de telha, quanto o capim funcionam como um filtro de separação da interface sólido-líquido (Figura 5). Os drenos de percolado no pé do talude passam por manutenções regulares, nas quais são realizados procedimentos de limpeza e de desentupimento causados, principalmente, pelo arraste de terra através de ventos e chuva (DMAE, 2021).

Figura 5: Cacos de telhas usados nos taludes para oferecer maior estabilidade à estrutura.



Fonte: Elaborado pela autora.

Desde 2006, o alteamento do aterro foi realizado utilizando-se da técnica da rampa, ou seja, os resíduos dispostos em camadas sucessivas, formando quatro plataformas com altura máxima de 5,0 m cada, com inclinação de 1:3, bermas com 5,0 m de largura, inclinadas 1% em direção ao pé do talude, onde foram instaladas canaletas de concreto em meia-cana para a captação e drenagem das águas superficiais. Na Figura 6 observa-se o plano de alteamento do Aterro Sanitário de Monte Carmelo. O aterro tem uma vida útil de 21 anos, que pode ser prolongada, se tiver um índice grande de reciclagem, como no programa para reciclagem da prefeitura o qual possibilita uma grande diminuição no volume total de resíduos (DMAE, 2021).

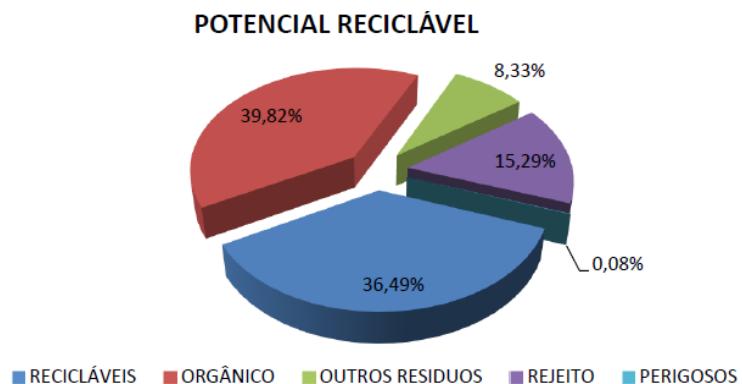
Figura 6 - Plano de alteamento do Aterro Sanitário de Monte Carmelo. Os números de 1 a 4 representam o alteamento progressivo esperado no aterro.



Fonte: DMAE (2021).

A drenagem das águas pluviais incididas a montante da projeção do último platô do aterro, são coletadas por um sistema de canaletas que são expandidas à medida que se desenvolve o maciço e desviadas para jusante, minimizando a produção de chorume e resguardando a estabilidade do aterro. Na Figura 7 está a distribuição gráfica dos materiais reciclados durante as atividades do aterro. Consta que a maior parte dos resíduos é composta por matéria orgânica e os materiais recicláveis mais comercializados (o PET e o alumínio) raramente são encontrados no lixo doméstico, visto que sua separação é realizada antes da coleta municipal (DMAE, 2021).

Figura 7 - Gráfico demonstrando o percentual dos recicláveis.



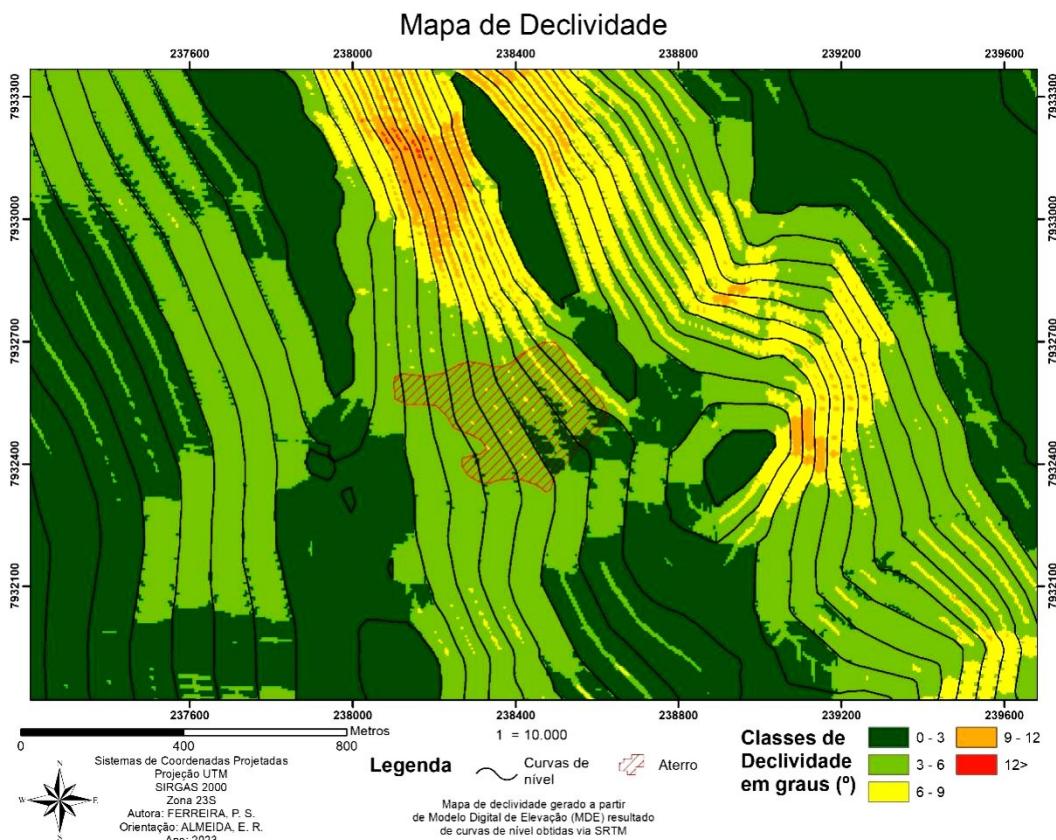
Fonte: DMAE (2021).

1.6.2. Aspectos fisiográficos do Aterro de Monte Carmelo

A área de estudo está situada na bacia do Córrego Lambari, em sua margem direita. O pé do talude do aterro do maciço dista aproximadamente 300 m da margem do curso d'água. A topografia local é característica com relevo de encosta suave, apresentando uma declividade média de aproximadamente 9,0% (Figura 8).

O aterro funciona desde 2006 e atende o município de Monte Carmelo e o distrito de Celso Bueno (MG), trabalhando atualmente com 64 toneladas de resíduos sólidos por dia. No aterro existem poços de água nos quais estão instalados piezômetros para o monitoramento do nível do freático. A empresa faz monitoramentos nos poços desde 2006¹, sendo um ponto a montante e três pontos a jusante da plataforma, atingindo a profundidade de seis metros (DMAE, 2021).

Figura 8 - Mapa de declividade da área de estudo.



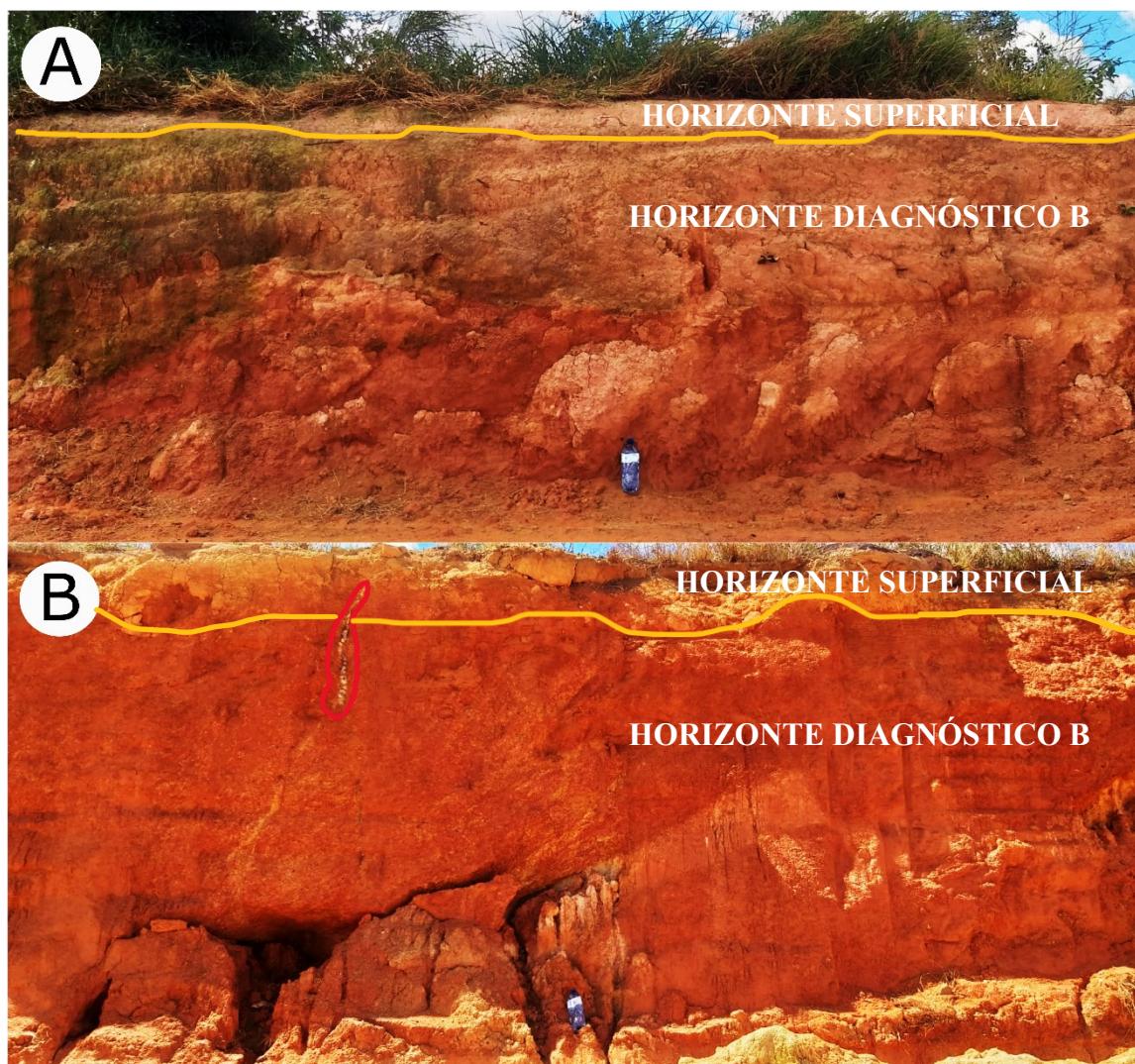
Fonte: Elaborado pela autora.

Os solos apresentam dois horizontes representados pelo solo coluvionar superficial e por solo residual subjacente ao colúvio. O primeiro é constituído por argila arenosa vermelha

¹ Informação verbal.

com espessura média inferior a 3,0 mm (Figura 9A). O segundo é representado por siltes argilosos com areia fina de consistência mole a média (DMAE, 2021). Os solos da área de estudo podem ser representados pelas Figuras 9A e 9B.

Figura 9 - A. e B. Fotografia de trincheiras realizadas pelo maquinário destacando a profundidade desse solo e seus respectivos horizontes. A decomposição dos granitos permitiu a formação de horizontes superficiais e diagnósticos bem definidos. Em vermelho, nota-se veio de quartzo residual.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste estudo é localizar prováveis plumas de contaminação e, caso existam, avaliar sua extensão na área de estudo.

2.2. Objetivos específicos

- I. utilizar do Método de Eletrorresistividade com a técnica de Caminhamento Elétrico (CE) com arranjo dipolo-dipolo para indicar possíveis zonas de contaminação no subsolo;
- II. fornecer indicações da direção preferencial, da profundidade e da maior concentração do fluxo de contaminantes no Aterro Sanitário de Monte Carmelo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Fase Preliminar

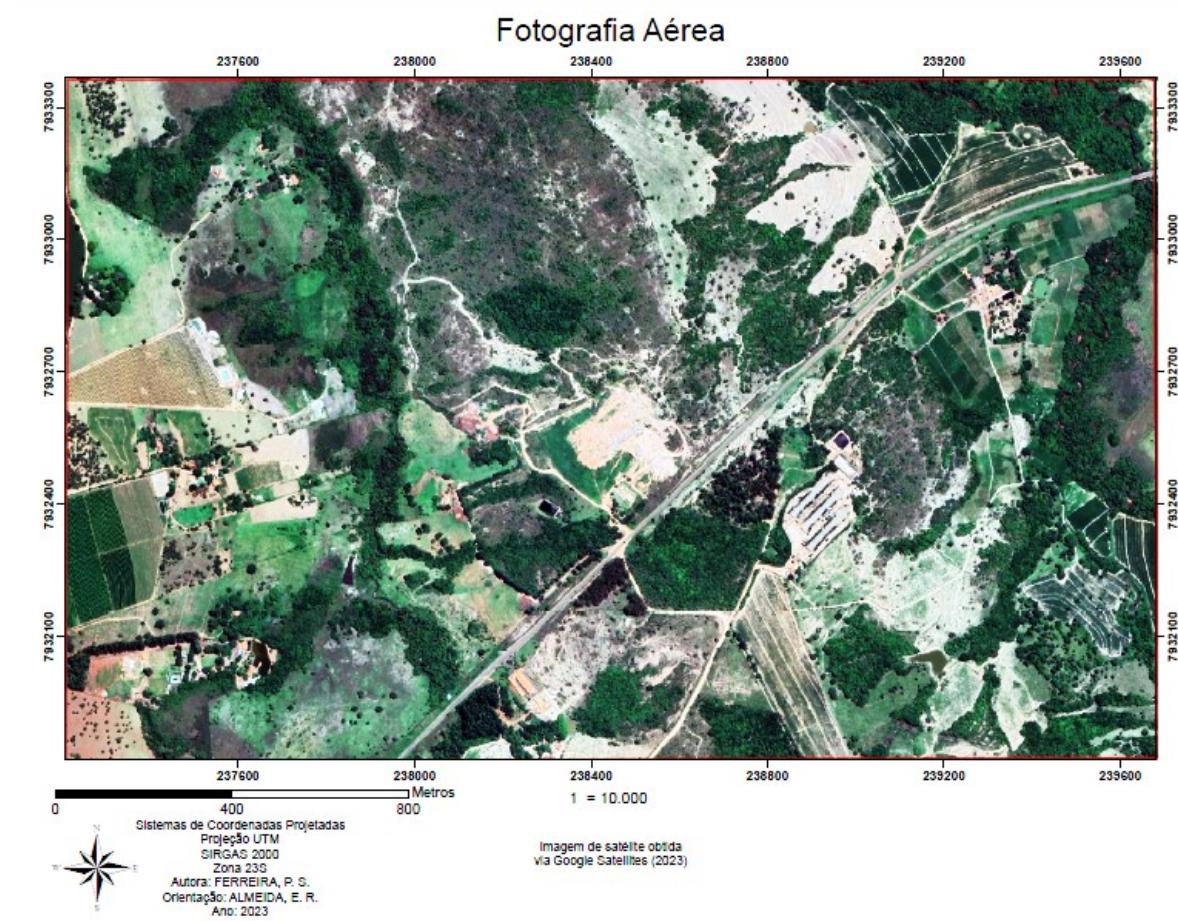
3.1.1. Levantamento Bibliográfico

A primeira etapa do desenvolvimento constitui de pesquisa bibliográfica em artigos revisados por pares, teses, livros, revistas, entre outros meios que tratam sobre contaminações em aterros sanitários e lixões a céu aberto. Essas pesquisas foram realizadas sob o viés da Geofísica Aplicada e do Método de Eletrorresistividade com a técnica de caminhamento elétrico (CE) usando arranjo eletródico dipolo-dipolo. Para este estudo, o CE é útil, pois permite uma visualização das propriedades físicas dos materiais geológicos em contexto 2D (variação lateral e vertical) que atinge maiores profundidades. Além disso, os eletrodos A e B não precisam ser deslocados a todo momento, apenas os eletrodos M e N, o que facilita o processo de aquisição de dados.

3.1.2. Elaboração dos Mapas

A Base Cartográfica foi confeccionada a partir de curvas de nível com espaçamento 5 metros, extraídas de imagens de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Foi utilizada para a base cartográfica e outros mapas a escala de 1:10.000, com área contemplando o perímetro do aterro e adjacências para melhor representação do meio físico local. Canais de drenagem, vias de acesso, sedes e área do aterro foram vetorizadas a partir de fotografia aérea, como observado na Figura 10, obtida através de *plug-in* em *software* de geoprocessamento QGIS.

Figura 10 - Fotografia área do Aterro Sanitário de Monte Carmelo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Além disso foi produzido o Mapa de Declividade (ver Figura 8), a partir das curvas de nível obtidas através do SRTM, onde foi utilizado um MDE (Modelo Digital de Elevação). Para reclassificar a declividade produzida no software QGIS foram determinados intervalos de declividade em graus, de 0 a 3°, 3 a 6°, 6 a 9°, 9 a 12° e maior que 12°.

O Mapa Geológico levou em consideração as unidades geológicas reconhecidas na Carta Geológica da Folha SE.23-Y-A-V - Monte Carmelo (CPRM, 2015), integrando dados observados em fotointerpretação de imagem de satélite do Google Earth (2023).

3.2. Fase de Campo

As atividades de campo ocorreram no Aterro Sanitário de Monte Carmelo no período entre 29 de abril e 01 de maio 2023 e tiveram autorização do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DEMAE). Previamente foi realizada uma visita de reconhecimento da área e da definição das melhores localizações para os perfis, visando a aquisição dos dados. Esta

aquisição se deu a partir do Método de Eletrorresistividade empregando a técnica de Caminhamento Elétrico para investigação 2D.

Os métodos geoelétricos usados para mapeamento de subsuperfície compreendem a eletrorresistividade, o potencial espontâneo e a polarização induzida. O presente estudo tem um enfoque no Método de Eletrorresistividade através da técnica de Caminhamento Elétrico para averiguar possíveis plumas de contaminação no Aterro Sanitário de Monte Carmelo. Serão apresentados, portanto, os conceitos de resistividade, método de eletrorresistividade e caminhamento elétrico, importantes para a caracterização do método adotado.

3.1. Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca dos materiais, medida em $\Omega \cdot \text{m}$, que quantifica a capacidade de oposição à circulação de cargas elétricas através de um material, sendo o inverso da condutividade (KEAREY et al., 2009). Para uma amostra cilíndrica de comprimento L e seção transversal de raio r de um material qualquer a resistividade elétrica é dada pela seguinte equação:

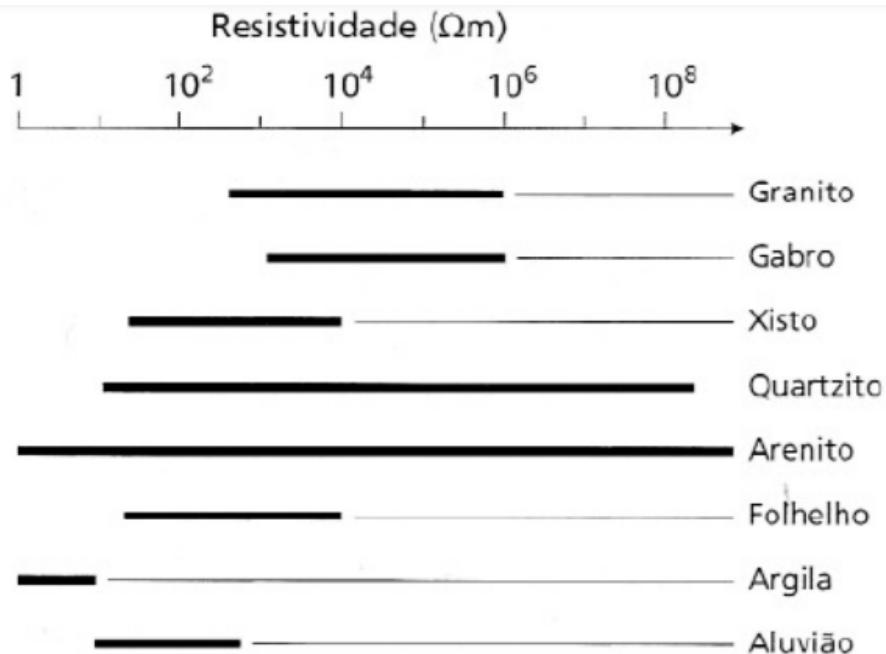
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{R \cdot A}{L} \quad (1)$$

onde:

- ρ é a resistividade elétrica em ohm.metros ($\Omega \cdot \text{m}$)
- σ é a condutividade elétrica em Siemens por metro (S/m)
- R é a resistência elétrica em ohms (Ω)
- A é a área transversal da seção do material em metros quadrados (m^2)
- L é o comprimento do material em metros (m)

A resistividade é uma das propriedades físicas com maior faixa de variação no material geológico (Figura 11). Tal fato pode ser observado nos minerais que possuem facilidade de condução elétrica, como o grafite e os metais nativos. Contudo, a maioria dos formadores de rocha são isolantes. Os processos eletrolíticos são os maiores condutores de íons e os poros das rochas geralmente fazem essa ligação, então quanto mais porosa a rocha melhor a condução por este meio (TELFORD et al. 1990).

Figura 11 - Valores aproximados de resistividade em ($\Omega \cdot m$) de alguns materiais geológicos.



Fonte: Braga (2016).

Os fatores essenciais que influenciam o fluxo de campos elétricos no subsolo são as propriedades elétricas: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética. Entre estas, a condutividade elétrica será a mais importante no método da eletrorresistividade (BRAGA, 2016).

A resistividade elétrica se encontra relacionada aos mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais. A propagação de corrente elétrica em solos e rochas acontece devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras das rochas e solos na qual a principal característica observada para comparação é composição mineralógica, porosidade, teor em água, quantidade e natureza dos sais dissolvidos (ELIS et al., 2004; MILSOM, 2003).

A condutividade elétrica de um material é a facilidade na qual ele demonstra em transportar cargas elétricas livres se refere à facilidade de transporte das correntes elétricas sob influência de campos elétricos externos, sendo amplamente utilizada na avaliação de subsuperfície na Geofísica Aplicada (OLIVEIRA, 2014; TELFORD, 1990). Essa influência é descrita pela Lei de Ohm, que relaciona a densidade de corrente elétrica (J) em qualquer ponto de um material de condutividade σ sob influência de um campo elétrico E :

$$J = \sigma E \quad (2)$$

Considerando que a condutividade elétrica do eletrólito aumenta com a temperatura e a concentração salina, é importante destacar que a solubilidade e mobilidade iônica dependem desses dois elementos. Neste contexto, o aumento de temperatura diminui a viscosidade do fluido, o que aumenta a velocidade dos íons no mesmo gradiente de potencial elétrico (TELFORD, 1990). Entretanto, em soluções com alta concentração de sais, íons podem ser restringidos pelo movimento dos íons vizinhos, o que pode provocar uma menor mobilidade.

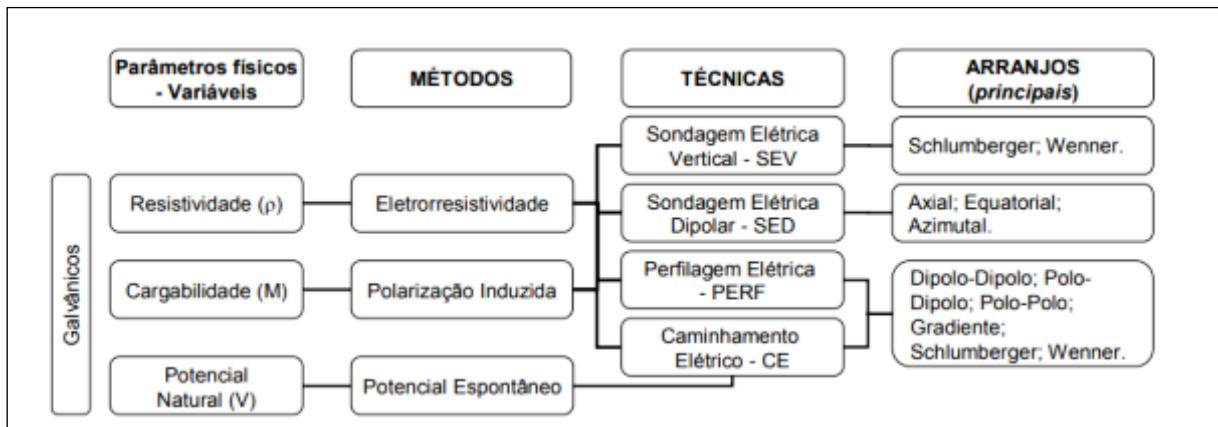
3.2. Método da Eletrorresistividade

Os métodos elétricos de investigação geofísica que utilizam de correntes diretas ou alternadas de baixa frequência para investigação de propriedades elétricas dos minerais em subsuperfície podem ser usados para ter o mesmo resultado na identificação de anomalias elétricas no meio estudado (KEAREY et al., 2009).

Braga (2016) apresenta a classificação dos métodos geoelétricos (Figura 12) aplicados com base na propriedade física analisada e na forma como estes dados são obtidos:

- **Método Geoelétrico:** refere-se ao parâmetro físico investigado. Para os parâmetros galvânicos, pode ser eletrorresistividade, polarização induzida ou potencial espontâneo.
 - **Técnica de investigação:** refere-se ao tipo de investigação dos parâmetros físicos. Pode ser subdividida em sondagens (investigações realizadas a partir de um ponto fixo na superfície), perfilagens (investigações no interior de furos de sondagem) e caminhamentos (investigações laterais a partir de pontos não fixos em superfície).
 - **Arranjo de desenvolvimento:** configuração geométrica dos eletrodos utilizados na investigação.

Figura 12 - Classificação dos métodos geoelétricos galvânicos.



Fonte: BRAGA (2016).

O levantamento de eletrorresistividade utiliza os dados da resistividade elétrica do subsolo para inferir suas características geológicas e hidrogeológicas. A corrente pode circular através do material de três maneiras: processos dielétricos, eletrolíticos e eletrônicos. A condução se dá por processos eletrônicos quando o material estudado é composto por uma fração de minerais condutores, permitindo o deslocamento dos elétrons quando este material é submetido a um campo elétrico externo. Já nos processos eletrolíticos os poros das rochas são utilizados como caminhos para circulação de íons desde que estejam preenchidos por um eletrólito (REYNOLDS, 2011).

Nesse método são injetadas correntes elétricas diretamente no solo através de eletrodos (KEAREY et al. 2009). Existem diferentes configurações e arranjos de eletrodos que podem ser utilizados, como as configurações Wenner e Schlumberger para investigações 1D e as configurações polo-polo, polo-dipolo e dipolo-dipolo para investigações 2D, entre outras. Cada configuração possui suas finalidades, vantagens e limitações, devendo ser selecionada a mais adequada de acordo com o objetivo da investigação e as condições do local. (WARD, 1988).

O método tem sua base na circulação de uma corrente elétrica (I) a partir da força eletromotriz (f.e.m.) gerada por uma fonte controlada conectada ao solo por dois eletrodos (A e B), denominados eletrodos de corrente, e na medida da diferença de potencial elétrico (ΔV) em outros dois eletrodos (M e N), denominados eletrodos de potencial. Assim, é possível calcular a resistividade aparente (ρ_a), dada em $\Omega \cdot m$ (BRAGA, 2016; CANATA et al, 2016).

A resistividade aparente (ρ_a) é o aspecto mais importante na prospecção geoelétrica (ORELLANA, 1972). Esse quesito depende exclusivamente da distribuição da resistividade em cada ponto dos espaços intersticiais entre os grãos das rochas, da disposição geoelétrica em

subsuperfície e do arranjo geométrico dos eletrodos. A resistividade aparente (ρ_a) é dada pela equação (3):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

onde:

ρ_a = resistividade aparente em $\Omega \cdot m$;

K = fator geométrico em m;

ΔV = diferença de potencial em mV;

I = corrente elétrica em mA.

O fator geométrico (K) depende apenas da disposição dos eletrodos e pode ser calculado pela equação (4):

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (4)$$

onde:

AM = distância (m) entre os eletrodos A e M;

BM = distância (m) entre os eletrodos B e M;

AN = distância (m) entre os eletrodos A e N;

BN = distância (m) entre os eletrodos B e N.

A partir do tratamento, modelagem e interpretação desses dados é possível inferir a presença de camadas geológicas, estruturas subterrâneas, zonas de água subterrânea e outras características relevantes abaixo da superfície do local de estudo. (TELFORD, 1940).

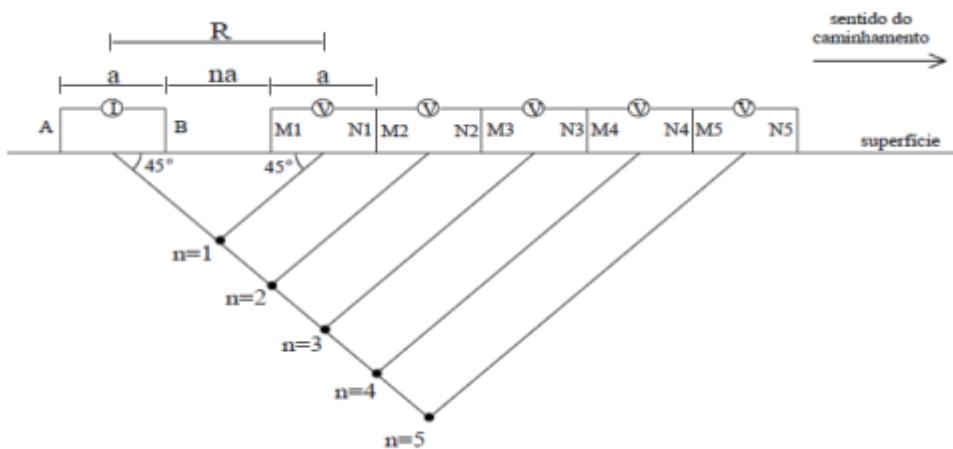
3.3. Caminhamento Elétrico

O Caminhamento Elétrico (CE) caracteriza-se como uma investigação 2D pois os dados são adquiridos tanto na dimensão de profundidade (vertical) e de distância (horizontal). Os eletrodos são deslocados ao longo de perfis, realizando assim as medidas de resistividade aparente (MOREIRA et al., 2006)

O presente trabalho utilizou o arranjo dipolo – dipolo, o qual é caracterizado por manter o espaçamento constante entre os eletrodos A e B e entre os eletrodos M e N, como demonstra

a Figura 13. Estes pares de eletrodos são separados por uma distância correspondente a um múltiplo inteiro (n) da distância entre os eletrodos (a). As medidas são realizadas sucessivamente em incrementos espaciais, movimentando-se os eletrodos que formam um dipolo de potencial alinhado com os eletrodos de corrente ao longo de uma linha do perfil. (REYNOLDS, 2011).

Figura 13 - Diagrama esquemático para a aquisição de dados em arranjo dipolo-dipolo.



Fonte: Gandolfo (2007).

As resistividades aparentes medidas durante o levantamento são apresentadas na forma de uma pseudo-seção. A pseudo-seção é uma forma conveniente de apresentar os dados de campo e os modelos correspondentes em levantamentos 2-D, e são frequentemente usados para explicar as informações. Entretanto, a depender do arranjo utilizado no CE podem ocorrer distorções nas anomalias em razão da não homogeneidade do terreno (LOKE et al., 2013). O processamento e a inversão das pseudo-seções de caminhamento elétrico resultantes têm como objetivo obter uma estimativa das resistividades elétricas verdadeiras a partir das pseudo-seções de resistividades aparentes (COBRAMSEG, 2022).

De acordo com Gallas (2000) e Ohmaye (2016), a maior vantagem do arranjo dipolo-dipolo consiste em este apresentar-se como um arranjo simétrico formando um dipolo alinhado, tendo maior facilidade de interpretação de uma pseudo-seção. No entanto, para Telford (1990) para aquisição dos dados de uma profundidade desejada, o espaçamento precisa ser quatro vezes essa profundidade. Sabe-se que as variações geológicas laterais, a topografia da superfície e o substrato rochoso, interferem na aquisição de dados precisos (BORGES, 2007).

Loke (2004) entende que este tipo arranjo demonstra ser sensível nas mudanças horizontais de resistividade, entretanto é insensível a variações verticais. A principal desvantagem do arranjo é a rápida redução da relação sinal/ruído em função do aumento do número de níveis de investigação (GANDOLFO; GALLAS, 2007). Assim, quanto mais distante o dipolo MN estiver do dipolo AB, menor será a razão sinal-ruído.

Durante as atividades de campo a região de contato entre os eletrodos e o solo foi saturada com uma solução de água e sal de cozinha para reduzir a resistência de contato e melhorar o acoplamento elétrico dos eletrodos no solo, favorecendo a troca de cargas elétricas entre o sistema de aquisição e o solo na área de estudo. Foram realizados três perfis de CE com espaçamento de 5,0 m entre os eletrodos de cada dipolo e em seis níveis de investigação (Figura 14), sendo:

- 1º Perfil: aquisição desse perfil se deu no dia 29 de abril de 2023 a jusante da Lagoa Anaeróbica e da Lagoa Facultativa e da plataforma 1, as quais recebem 70 litros de chorume por hora (DMAE, 2021). O perfil 1 foi realizado numa extensão de 145 metros e as lagoas estão dispostas a partir dos primeiros 75 metros do perfil.
- 2º Perfil: O segundo perfil de aquisição foi realizado no dia 30 de abril de 2023 em uma estrada à jusante da plataforma 2 (Figura 15). O perfil gerado em um percurso de 150 metros de comprimento.
- 3º Perfil: O terceiro perfil de aquisição foi realizado dia 1 de maio de 2023 na rampa de acesso na parte superior da plataforma 2 e a 5 metros de distância do poço 1.

Figura 14 - Mapa de satélite do aterro sanitário de Monte Carmelo, destacando todos os perfis realizados, a lagoa anaeróbica (a menor), a lagoa facultativa (a maior) e a localização do poço 1.



Fonte: Google Earth (2024).

Figura 15 - Foto da Plataforma 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

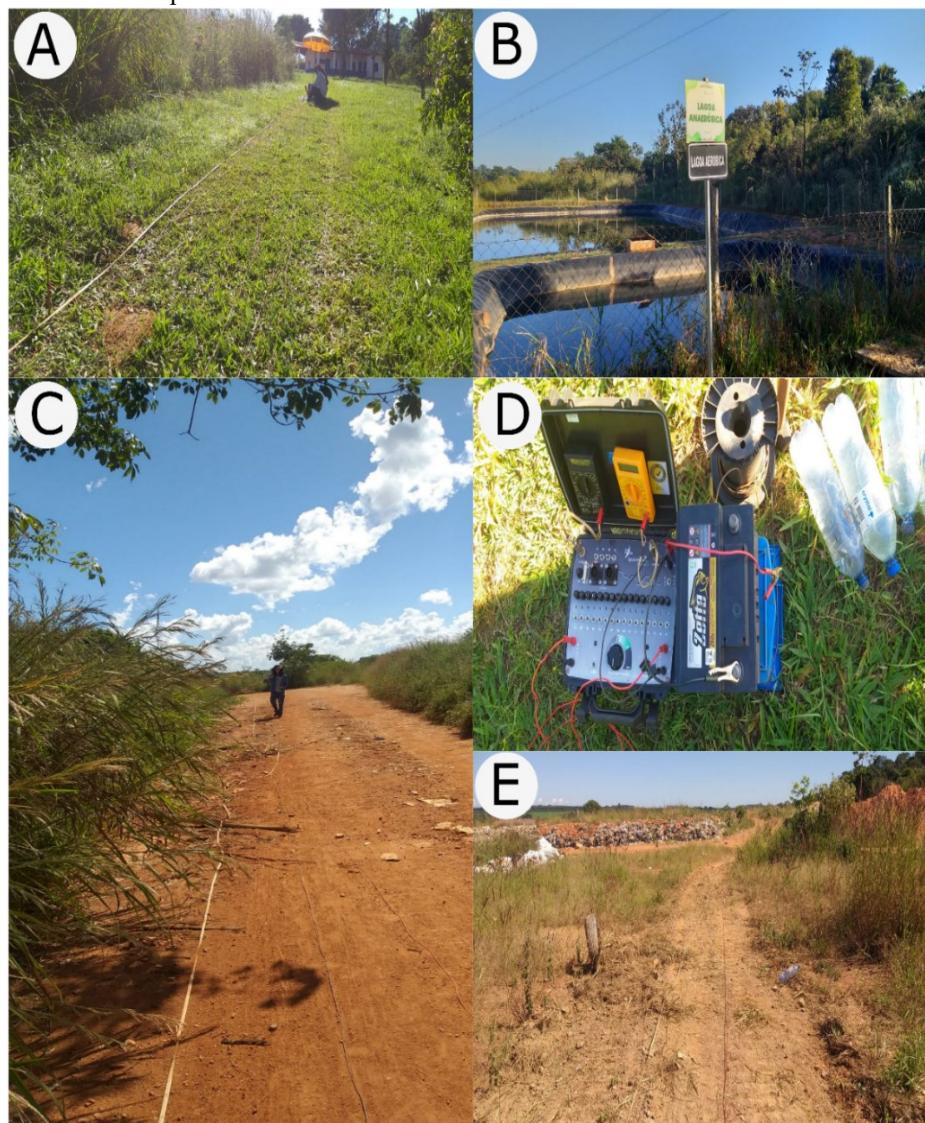
Os dados coletados nos levantamentos elétricos passaram pela etapa chamada de Inversão Geofísica. Segundo Rigoti (1998), a inversão de dados elétricos é descrita como a mudança interativa de parâmetros do modelo até que se tenha o melhor ajuste entre os dados calculados a partir do modelo e os dados observados em campo. Esta etapa é necessária porque

as medições de resistividade coletadas no campo são valores aparentes que representam uma contribuição de todo o pacote geológico, não estão representando os valores reais das camadas. Isso acontece devido ao fato de que a resistividade medida sobre um meio heterogêneo sofre influência de diversos valores de resistividades existentes no volume investigado do subsolo. A inversão dos dados de campo resulta em uma imagem 2D do terreno investigado onde são representadas as variações de resistividade em função da distância e da profundidade, chamada de seção geoelétrica, que permite uma interpretação quantitativa da área. Entretanto, o melhor ajuste em medidas de resistividade como as efetuadas no presente estudo fica, em média, em torno de 12% devido ao erro aleatório que inevitavelmente contamina os dados.

Todos os dados de resistividade aparente obtidos nos levantamentos foram analisados utilizando o *software* RES2DINV, que faz a minimização por Quadrados Mínimos através do método de Gauss-Newton com restrição de suavidade para produção do modelo 2D da subsuperfície, a partir da resistividade aparente (SASAKI, 1992). Além disso, o *software* permite gerar seções transversais e longitudinais a partir dos dados de campo e suporta diversos arranjos, entre eles: Wenner, Schlumberger, polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo, gradiente múltiplo e matrizes não convencionais (LOKE; BAKER, 1996). O *software* executa os cálculos para estimar os melhores parâmetros de modelo inverso para um conjunto de dados, fornecendo assim uma estimativa da resistividade real do subsolo e das possíveis variações presentes (e.g. plumas químicas).

Por fim, os modelos obtidos foram interpretados e integrados em conjunto com as informações bibliográficas disponíveis. A Figura 16 demonstra os locais e instrumentos de aquisição de dados envolvidos para a caracterização de plumas de contaminação no Aterro Municipal de Monte Carmelo.

Figura 136 – A. Local de aquisição do perfil 1 realizada na estrada a jusante a plataforma 1 e a jusante das lagoas de chorume. B. Lagoa Anaeróbica e Lagoa Aeróbica. C. Ponto de aquisição do perfil 2 realizado na estrada, a jusante da plataforma 2. D. Equipamento usado na aquisição de dados. E. Local de aquisição do perfil 3 realizado na estrada de acesso sobre a plataforma 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.1. Instrumentação

Os dados foram adquiridos se utilizando de um eletrorresistivímetro X5Xtal Control (Autoenergia) e dois multímetros digitais. Uma bateria de 12V / 60 Ah foi utilizada como fonte de corrente elétrica e barras de alumínio foram utilizadas como eletrodos (Figura 17). Os dados foram obtidos nas malhas de aquisição dos perfis e os valores de resistência de contato foram todos anotados. O procedimento tem como finalidade verificar eventuais problemas de acoplamento entre o eletrodo e o solo, evitando a aquisição de dados incoerentes.

Figura 147 - Resistivímetro X5Xtal Control.



Fonte: Elaborado pela autora.

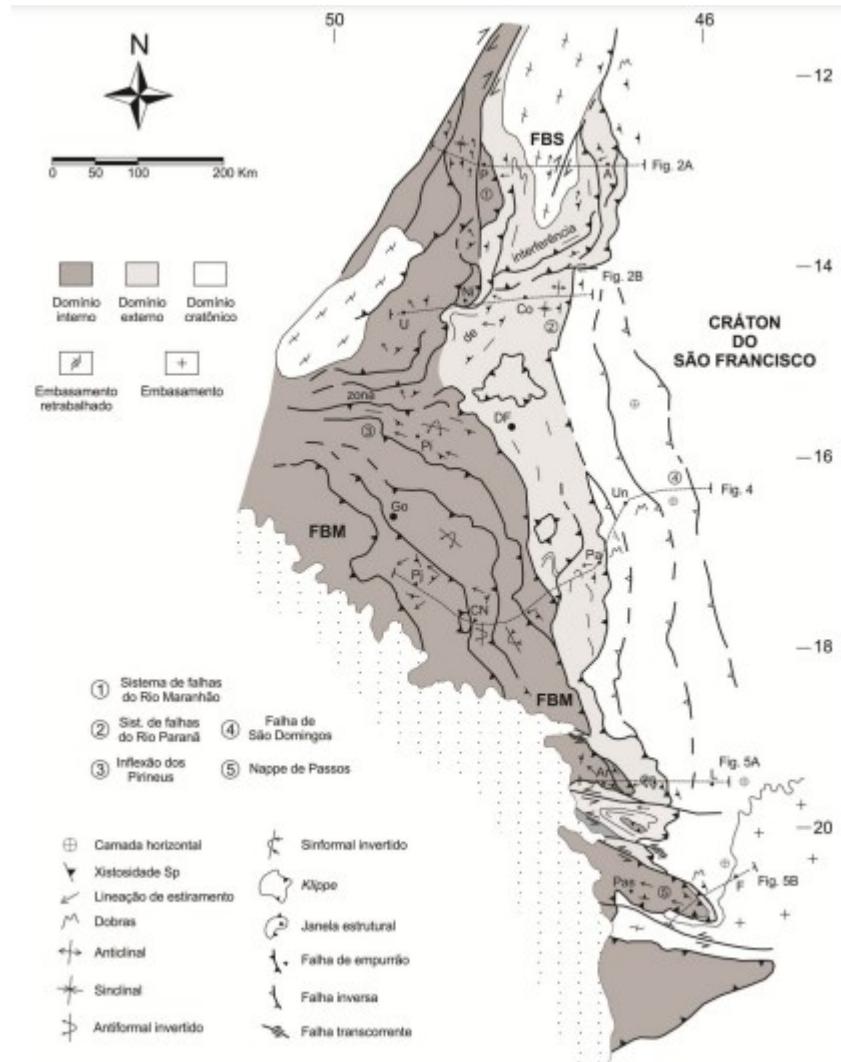
4. REFERENCIAL TEÓRICO

5. GEOLOGIA REGIONAL

5.1. Faixa Brasília

A área de estudo faz parte da porção meridional da Faixa de Dobramentos Brasília, situada na margem passiva neoproterozoica. Segundo Fuck (1994) e Valeriano et al. (2004), a Faixa Brasília está localizada na porção oriental da Província Tocantins, sendo limitada pelo Cráton São Francisco, à leste, e pelo Cráton Amazônico e Bacia do Paraná, à oeste (Figura 18). É mencionada como um cinturão de dobramentos de idade Neoproterozoica, com cerca de 1.200 km de extensão na direção norte-sul e 300 km de largura (UHLEIN et al. 2012), estendendo-se pelos estados de Minas Gerais, Goiás, Tocantins e pelo Distrito Federal.

Figura 15 - Mapa estrutural da Faixa de Dobramentos Brasília.



Fonte: Uhlein et al. (2012).

O cinturão de dobramentos é dividido em dois setores estruturais, designados de setentrional e meridional, com orientações diferentes que acentuam as diferenças na evolução tectônica. A Megaflexura dos Pirineus separa a segmentação tectônica das porções norte e sul (ALMEIDA, 1967; UHLEIN et al., 2012).

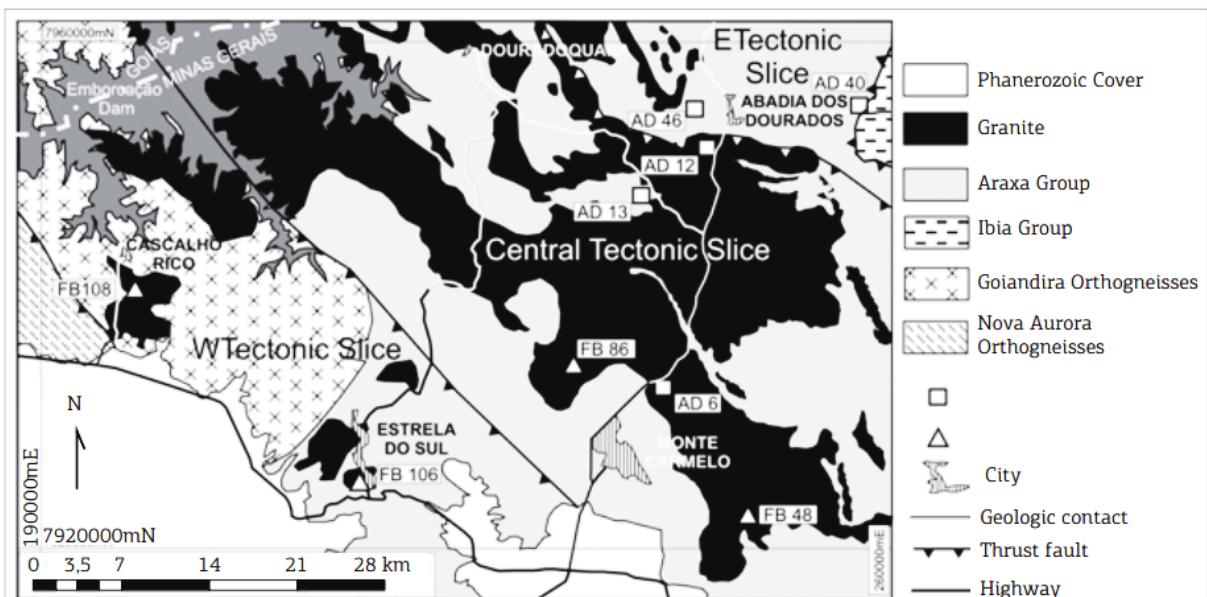
A colisão entre os crátions amazônico e do São Francisco entre 560 a 540 Ma (UHLEIN et al., 2012) produziu um evento deformacional transpressivo, com a formação de zonas de cisalhamento transcorrentes destrais de direção N-S e empurrões oblíquos, os quais deram origem ao setor setentrional da Faixa Brasília (FONSECA et al. 1995 e 1997; FONSECA, 1996; VALERIANO et al., 2004). O setor meridional faz parte de uma sequência de terrenos alóctones e autóctones empilhados na forma de extensas *nappes* sub-horizontais, formada pelo

cavalgamento das unidades metassedimentares sobre o Cráton do São Francisco, com idade de aproximadamente 650 a 580 Ma (VALERIANO et al. 2004, 2008).

5.2. Complexo Monte Carmelo

De acordo com Brod et al. (1991) e Seer e Moraes (2013), a unidade Complexo Monte Carmelo (CMC) se caracteriza por um batólito Neoproterozoico situado entre os municípios de Monte Carmelo (MG) e Abadia dos Dourados (MG), que está vinculado aos episódios de granitogênese do Grupo Araxá (Figura 19). Barbosa et al. (1970) designou esta unidade apenas como complexo granito-gnáissico, e o termo Complexo Monte Carmelo foi adotado posteriormente, de acordo com Pereira et al. (1983). De acordo com datações U/Pb realizadas em zircões, a idade aproximada de cristalização do complexo é de 790 Ma (SEER; MORAES, 2013).

Figura 169 - Mapa geológico da região de Monte Carmelo.



Fonte: Seer e Moraes (2013).

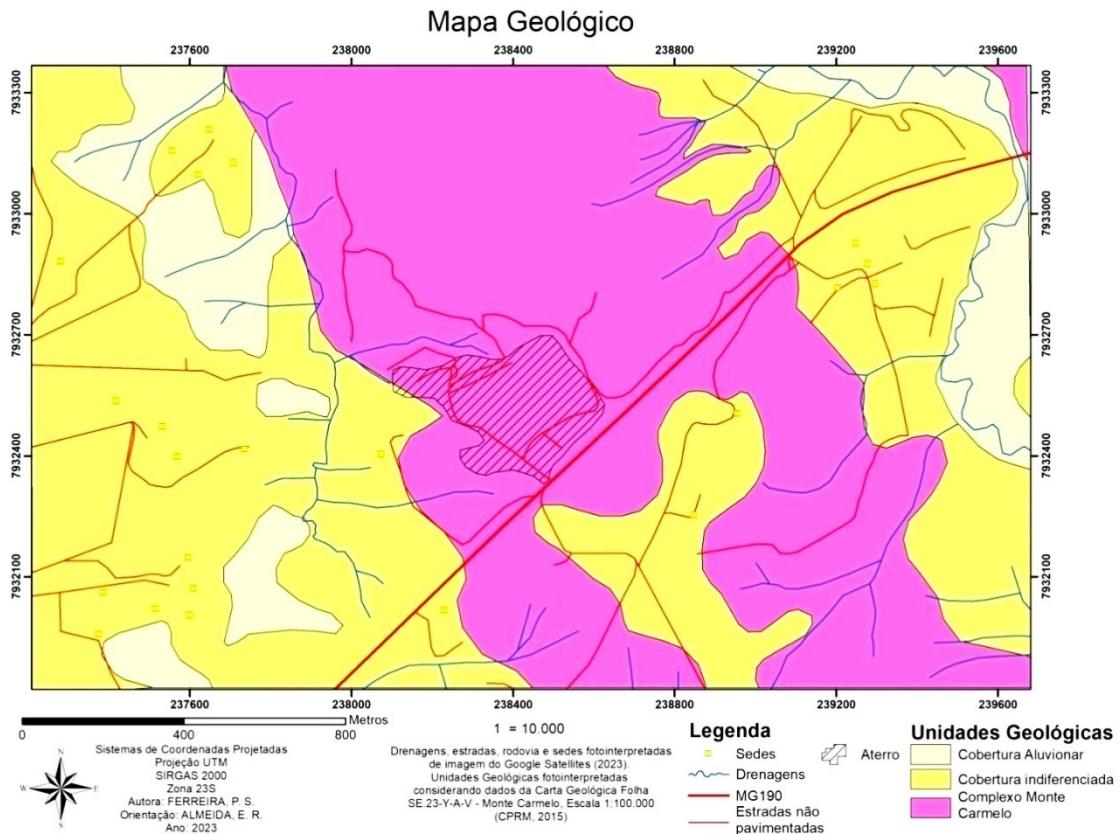
Houve três episódios de granitogênese na região: o mais antigo (833 Ma), retratado pelo granito Quebra Anzol, que ocorreu ainda em ambiente intraplaca; o intermediário (790 Ma), em conjunto a eventos magmáticos pré-colisionais, representado pelo Complexo Monte Carmelo; e o mais recente (642-630 Ma), associado a evento colisional, sendo associado pelos granitos peraluminosos Serra Velha, Tamanduá, Pirapetinga, Galheirinho, Perdizes, Estrela do Sul e Cascalho Rico. O episódio mais atual de granitogênese atingiu parcialmente as rochas do CMC (SEER; MORAES, 2013).

As rochas do Complexo Monte Carmelo são formadas por granitoides metaluminosos a peraluminosos de cor cinza claro a médio e granulação fina a grossa, levemente deformados (SEER; MORAES, 2013) e gnaisses e ortognaisses milonitzados de cor cinza esbranquiçada a amarelados, com granulação fina a média. Há registros da ocorrência de veios pegmatíticos, xenólitos de micaxisto, quartzito e anfibolito (CPRM, 2014; SANTOS, 2019).

Os granitoides possuem a mineralogia principal com porcentagens variadas de quartzo, ortoclásio, plagioclásio e biotita, sendo classificados como granodioritos, tonalitos, sienogramitos e monzogramitos. Minerais acessórios como titanita, apatita, zircão, muscovita e granada são presentes, sobretudo nos sienogramitos e monzogramitos, e a alteração hidrotermal dos granitoides é evidenciada pela existência de sericita e epidoto como minerais secundários. (SEER et al. 2007; SEER; MORAES, 2013). A textura dos granitoides é variada: granoblástica equigranular, porfiroclástica, inequigranular, cataclástica e milonítica, apresentando porfiroclastos e porfiroblastos de k-feldspato e quartzo fortemente estirados nos gnaisses milonitzados (FÉBOLI, 2017; SANTOS, 2019).

O mapa geológico indica que os granitoides são dominantes na porção no qual está localizado o Aterro Sanitário de Monte Carmelo, sendo delimitados por fotointerpretação (Figura 20). Além disso, as unidades fanerozoicas predominam em relevo aplainado em áreas com predomínio de plantações, sendo definidas a Cobertura indiferenciada (cobertura detritica indiferenciada), e a Cobertura Aluvionar, em referência a locais de acúmulo fluvial e/ou hidromorfismo também entendidos como depósitos aluviais.

Figura 20 - Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com Seer et al. (2007) e Seer e Moraes (2013), o batólito integra a lasca tectônica intermediária do Grupo Araxá, que é constituída por anfibolitos médios a grossos anfibólio-clorita xistas. Os granitoides do Complexo Monte Carmelo são sintectônicos e aproveitaram as falhas de direção N40W como zonas de ascensão, sendo intensamente deformados nas bordas e apresentando foliação principal de baixo ângulo com mergulho para oeste (BROD et al. 1991; FÉBOLI, 2017).

As rochas do Complexo Monte Carmelo se originaram a partir de fontes juvenis do final do Mesoproterozoico, como sugerem dados de $\varepsilon_{\text{Nd}}^2$ negativos e TDM³ de 1,29 Ga. Os valores dão respaldo a hipótese da existência de um arco magmático na região, semelhante ao Arco Magmático de Goiás (SEER; MORAES, 2013).

^{2 ; 3} Parâmetros geoquímicos isotópicos que relacionados à datação de rochas.

De acordo com Seer e Moraes (2013), há a presença de um arco magnético na região, onde teriam se originado os granitoides (Complexo Monte Carmelo) associados a deposições em ambiente marinho profundo (Grupo Araxá). A posterior erosão deste arco originou nova deposição de sedimentos em períodos mais recentes (Grupo Ibiá). Em meio ao ambiente deposicional de fundo oceânico houve ainda o desenvolvimento um ambiente geotectônico divergente com formação de uma sequência de rochas associadas à crosta oceânica, no qual essas deram origem às litologias do Complexo Abadia dos Dourados.

A etapa de fotointerpretação, como sugere Zaine (2011), demonstrou que as áreas com cores esbranquiçadas a acinzentadas claras apresentam relevo acidentado e com maior padrão de rugosidade, sendo assim delimitados como gnaisses granitoides em referência ao Complexo Monte Carmelo. No aterro sanitário foi confirmada a presença de matacões graníticos da unidade, o que abre hipóteses quanto a extensão desses blocos em subsuperfície (Figuras 21 e 22).

Figura 17 - Granitoides do Complexo Monte Carmelo com foliação acebolada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 - Bloco de granitoide residual.



Fonte: Elaborado pela autora.

6. RESULTADOS

Os resultados foram analisados através do *software* Res2DInv e foi possível realizar interpretações referentes à possibilidade da ocorrência de plumas de contaminação. Em síntese, as seções mostradas nas figuras 23, 24 e 25 apresentam colorações distintas a fim de destacar áreas anômalas. Neste sentido, cores mais azuladas indicam materiais mais condutivos, enquanto cores mais avermelhadas indicam contextos mais resistivos. Setores com alta condutividade são associados à presença de materiais com uma maior facilidade de condução de corrente elétrica, a exemplo do chorume normalmente produzido pelos resíduos sólidos do aterro. Além disso, os resultados são apresentados em três pseudo-seções: a superior contém a resistividade aparente medida em campo, a do meio apresenta os valores de resistividade aparente calculada no processo de inversão e a inferior contém o modelo inverso, ou seja, aquele onde foram feitas as interpretações. Abaixo são apresentados os resultados dos caminhamentos elétricos realizados (CE1, CE2 e CE3).

6.1. CE1

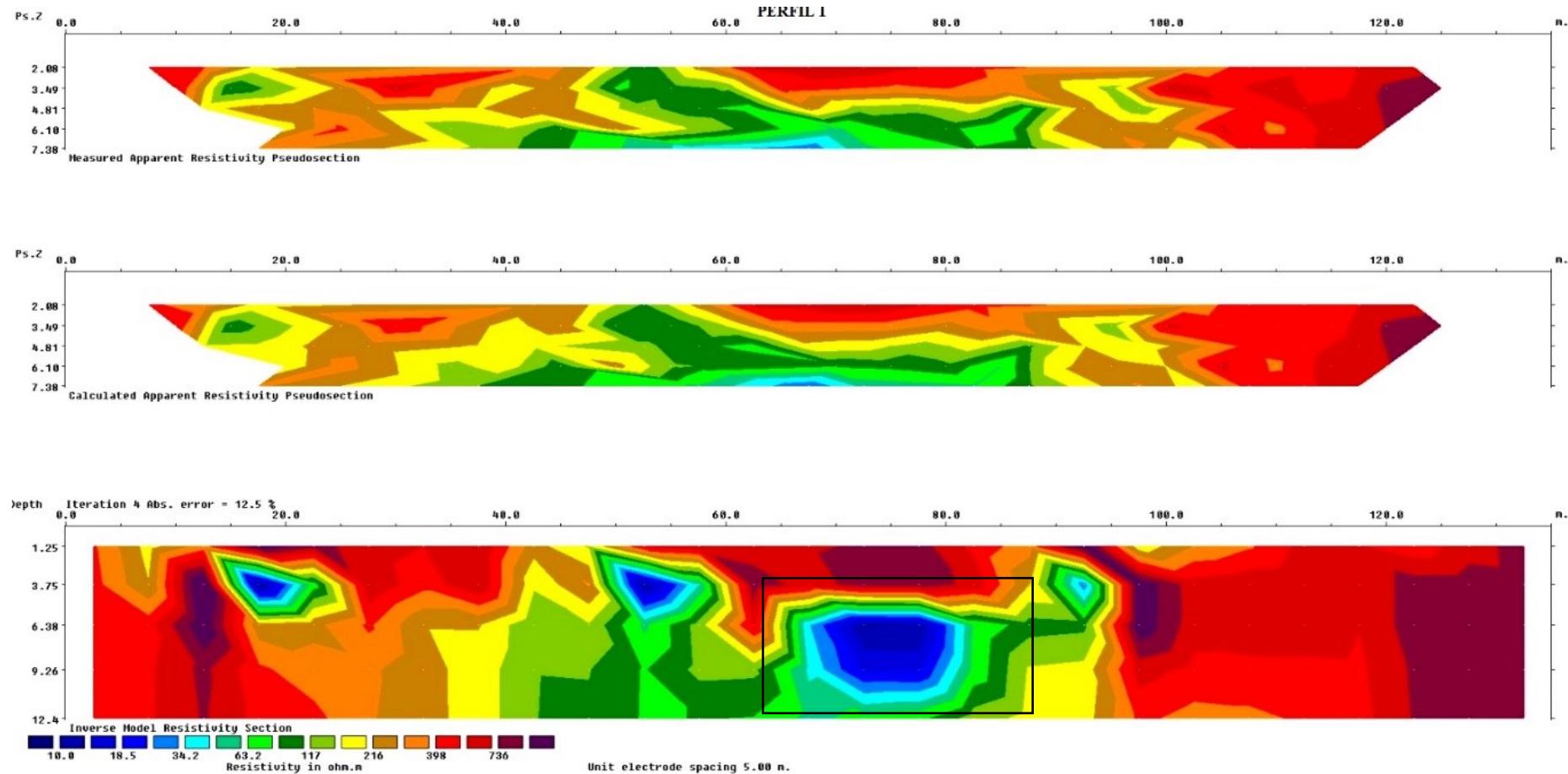
Nesta seção foram usados somente cinco níveis de investigação e não seis como nos demais (Figura 23), em razão do alto nível de ruído observado no 6º nível, o que fez com que vários pontos ficassem fora da curva de aceitabilidade e proporcionando valores de erro de ajuste mais elevados. A curva de aceitabilidade determina o parâmetro de medida aceitável da corrente que é aplicada nos eletrodos, ou seja, quando reduzida não há um bom retorno dos

resultados. Neste caso, o percentual de erro que deveria estar em torno de 5% para uma condição ótima resultou em um valor de 12%, considerado relativamente alto. Isto ocorre devido a uma limitação de potência do instrumento utilizado, que dificultou a aquisição de pontos em níveis de investigação mais profundos.

Este perfil foi realizado a jusante das lagoas de chorume que se iniciam no perfil a 70 metros. O comprimento total do perfil foi de 135 metros de comprimento, na direção SE da plataforma de resíduos. Observa-se que no modelo gerado (Figura 23) existem áreas com alta resistividade, como nos intervalos 8 - 40 m de comprimento e 2 m e até 12,4 m de profundidade. Este ponto fica próximo de uma estrada pavimentada com cacos de telhas, o que dificulta a aquisição de dados pelo menor contato entre os eletrodos e o solo e consequente aumento da resistência de contato impedindo o acúmulo de umidade necessária para a passagem de corrente elétrica iônica. De maneira similar, a região entre 95 e 120 m de comprimento, é caracterizada por uma alta resistividade entre 2 e 17 m de profundidade, que provavelmente indica a presença de um bloco de granito, tendo em vista que nessa área eles afloram em pequenas profundidades. Essas anomalias de resistividade (colorações vermelho e vinho) assumem valores que entre 398 $\Omega\cdot m$ e 736 $\Omega\cdot m$.

Anomalias de resistividade intermediária (100 a 200 $\Omega\cdot m$) e de baixa resistividade (34,2 $\Omega\cdot m$ a 18,5 $\Omega\cdot m$) também são observadas. As anomalias de resistividade intermediária ocorrem entre as distâncias de 34 e 95 metros a uma profundidade de até 5,0 m, indicando um aumento significativo de condutividade elétrica em comparação com o restante do perfil. A condutividade aumenta ainda mais no intervalo de 15 a 20 metros de comprimento e de 3 a 6 metros de profundidade e no intervalo de 48 a 58 m de comprimento e de 2 a 5,5 m de profundidade. Ambas as anomalias são rasas e de pouca extensão lateral, sugerindo fontes não associadas às lagoas de chorume. Em contrapartida, uma zona maior de baixa resistividade (5 a 50 $\Omega\cdot m$) é identificada a 5,5 m de profundidade e entre 67 e 80 m de distância. Neste caso, a anomalia coincide com a localização das lagoas de chorume, indicada pelo retângulo preto.

Figura 193 - Seção de eletrorresistividade das proximidades das lagoas de chorume e modelo geológico/geofísico elaborado a partir da correlação entre dados de resistividade elétrica. O retângulo preto indica a posição das lagoas de chorume no Aterro Sanitário de Monte Carmelo.



6.2. CE2

Esta seção foi realizada a jusante da plataforma 1 de resíduos e a montante das lagoas de chorume em uma estrada utilizada por maquinário pesado. Por este motivo, a estrada possui uma pavimentação compacta composta por um assoalho de lateritas (cascalho) e cacos de telha, resultando em dificuldades na aquisição dos dados. O percentual de erro nesta malha ficou em torno de 19,3% devido à alta resistência de contato proporcionada pelo solo extremamente compactado.

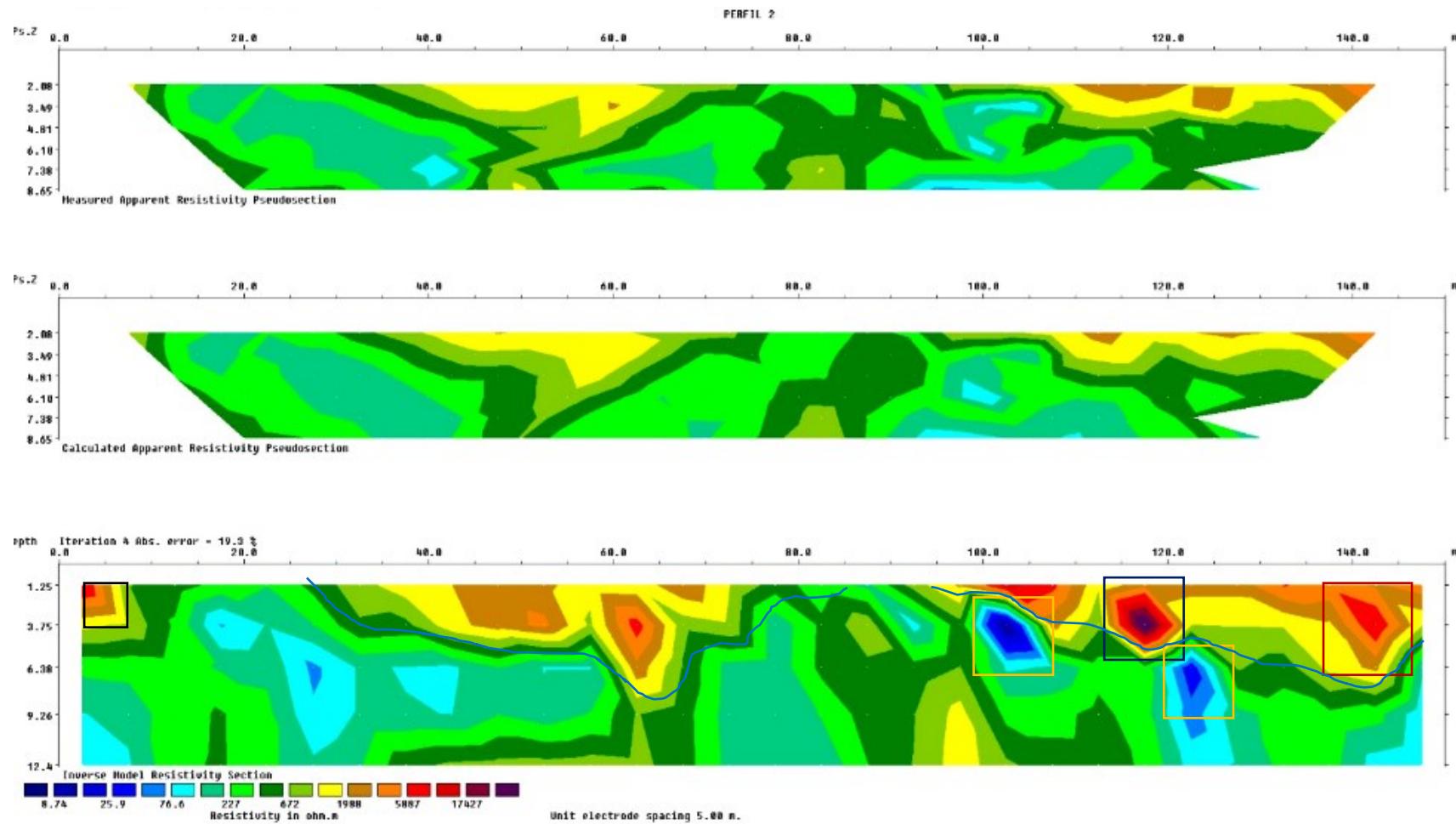
A Figura 24 apresenta os dados referentes ao CE2. Observa-se uma anomalia de alta resistividade entre 1,25 -1,50 m de profundidade e 2 a 4 metros de comprimento (retângulo preto), com valores de 1.988 a 5.887 $\Omega\cdot m$. Outras duas anomalias similares aparecem nas distâncias de 60 m e 140 m (retângulos vermelhos) e uma terceira de resistividade ainda mais alta ($\rho > 18.000 \Omega\cdot m$) pode ser identificada na distância de 117 m (retângulo azul). Enquanto as resistividades das anomalias em 60 m e 140 m são coerentes com os valores de resistividade adjacentes, a anomalia em 117 m representa um único ponto com resistividade muito mais alta do que os pontos adjacentes. Isso sugere que não trata de uma anomalia real, mas sim de uma variação sofrida pelo dado em razão de mau acoplamento elétrico causado pela alta resistência de contato. Entretanto, a remoção deste ponto da malha de dados não se mostrou viável no processamento por prejudicar ainda mais o erro do modelo em caso de remoção.

Ocorrem outras anomalias de alta resistividade na extremidade da malha nos intervalos de 115 a 122 (retângulo azul) e 138 a 143 metros de comprimento (retângulo vermelho) e 2 a 3,75 metros de profundidade; com valores médios de 5.887 $\Omega\cdot m$, contudo a maior parte da seção ficou entre 227-672 $\Omega\cdot m$. Entretanto, na maior parte da área mapeada os valores de resistividade variam entre 22,7-1.988 $\Omega\cdot m$.

Assim como no CE1, é possível observar na profundidade em torno de 5,0 m observar-se aumento considerável na capacidade condutiva do subsolo. Aqui nota-se uma possível separação (linha contínua azul) entre o horizonte resistivo, mais raso, e o horizonte condutivo, mais profundo, presente em quase toda a extensão do perfil.

Nos intervalos representados pelos retângulos laranjas, de 100 a 108 metros (profundidade de 1,5 a 6,0 m) e 120 a 125 metros (profundidade de 6,0 a 7,5 m), ocorrem duas anomalias de baixa resistividade com valores que variam de 8,74 a 76,6 $\Omega\cdot m$.

Figura 24 - Seção de eletroresistividade da área não contaminada (background) e modelo geológico/geofísico elaborado a partir da correlação entre dados de resistividade elétrica. Os retângulos coloridos delimitam anomalias importantes, que estão melhor descritas no texto.



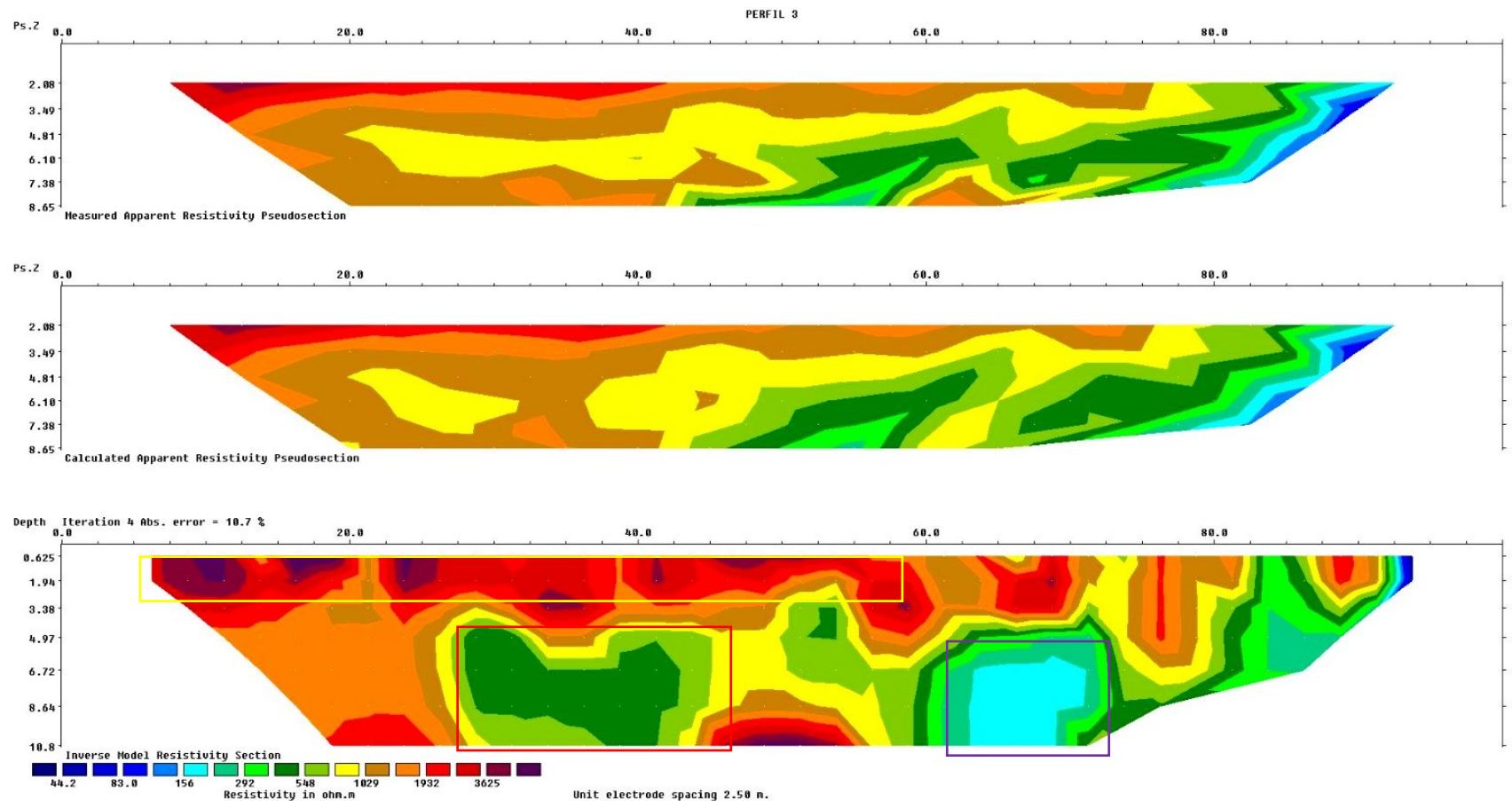
6.3. CE3

Esta seção encontra-se a montante da plataforma 2 de resíduos, na porção nordeste do aterro (Figura 25). Os valores da resistência de contato foram os mais altos dentre os observados, ficando acima de $20\text{ k}\Omega$ devido ao solo muito compactado e seco, e pelo fato da malha estar localizada em uma estrada utilizada por veículos pesados acima da plataforma. Essas anomalias de alta resistividade estão mais próximas à superfície, ocorrendo nos primeiros metros da terceira pseudo-seção de 1 a 3,5 metros de profundidade e dos 8 a 75 m de comprimento (retângulo roxo), tendo estes os valores de resistividade de 1932 a 3625 $\Omega\cdot\text{m}$. Por estar tão próxima da superfície essa anomalia pode estar intrinsecamente ligada à pavimentação da estrada na qual a malha foi feita.

Anomalias de alta resistividade pode estar relacionadas aos afloramentos de matacões graníticos com veios de quartzo. No modelo invertido essas anomalias de alta resistividade são ressaltadas no total da sua profundidade, de modo que a anomalia ocorre de 17,5 m a 23 m de comprimento na malha e de 9 a 10,8 metros de profundidade (retângulo vermelho), sendo possivelmente um matacão de granito, pois os pavimentos não chegam a essa profundidade. A queda progressiva nos valores de resistividade pode estar relacionada à ação corrosiva de líquidos ácidos nos constituintes geológicos, principalmente nos óxidos e hidróxidos de ferro, resultando na dissolução e solubilização dos minerais. Assim, a contínua dissolução dos minerais responsáveis pelos altos valores iônicos poderia facilitar a passagem da corrente elétrica no meio natural.

No perfil 3 percebe-se uma anomalia de baixa resistividade (coloração azul claro) que se posiciona entre 6,72 e 10,8 metros de profundidade (retângulo amarelo), no limite do caminhamento. Esta anomalia assume valores próximos a $156\text{ }\Omega\cdot\text{m}$. Com exceção da anomalia de resistividade em torno de $100\text{ }\Omega\cdot\text{m}$, nesse perfil não há indícios claros de possíveis plumas de contaminação como os observados nos dois perfis anteriores. Isto se dá, pois a anomalia está posicionada muito próxima do limite dos dados.

Figura 25 - Seção de eletroresistividade da área não contaminada (background) e modelo geológico/geofísico elaborado a partir da correlação entre dados de resistividade elétrica. Os retângulos coloridos delimitam anomalias importantes, que estão melhor descritas no texto.



7. DISCUSSÃO

No CE1, feito em frente às lagoas de chorume, nota-se a ocorrência de anomalias tanto de alta quanto de baixa resistividade, ficando mais visíveis a partir dos 36 m que coincidem com a posição das lagoas. As anomalias de baixa resistividade observadas nas distâncias de 15 a 20 metros de comprimento e de 48 a 58 metros de comprimento (ver Figura 23), sugerem a presença de alvos não relacionados às lagoas de chorume. Essas anomalias podem ter como causa a migração de fluidos residuais da Plataforma 1 (ver Figura 2) por sistemas de baixa pressão ou a maior porosidade do substrato (latossolo com matacões de granito) associados à maior declividade do terreno. Em contrapartida, os valores de baixa resistividade localizados entre 67 e 80 m de comprimento são significativos pois podem indicar a presença de um vazamento de grande extensão possivelmente oriundo da lagoa de chorume.

Os dados do CE2 apresentaram níveis de ruído significativos devido ao solo muito compactado e seco para inserção dos eletrodos, dificultando a circulação da corrente elétrica. Ainda assim, nota-se a existência de um horizonte de resistividade intermediária (em torno de $100 \Omega \cdot m$) por quase toda a extensão do perfil. A localização e a resistividade deste horizonte coincidem com a região de resistividade intermediária do CE1, sugerindo que ambos possam estar interligados em subsuperfície. Os dados não permitem afirmar categoricamente a natureza deste horizonte, porém considerando sua proximidade com a Plataforma 1 e com as lagoas de chorume, há alta probabilidade de tratar-se de percolação de material condutivo, possivelmente contaminante. Considerando esta análise, é possível que as anomalias de baixa resistividade observadas nas distâncias de 27,0 m, 100 m e 124 m sejam referentes à tubulação subterrânea. Novamente, apenas com os dados coletados não é possível confirmar que as anomalias observadas neste perfil são causadas apenas pela tubulação ou por possível aumento na concentração de chorume proveniente de vazamento, já que não foram obtidas informações sobre a localização exata da tubulação.

O CE3 realizado acima da plataforma foi o de mais complexa coleta de dados em razão da dificuldade de penetração dos eletrodos no substrato, da passagem de energia em solo impermeável, assim como pela presença de cacos de telhas. Por este motivo, o CE foi realizado com corrente elétrica em valores mais baixos do que o adequado para situações ideais. À medida que a distância aumenta e aproxima-se dos resíduos sólidos depositados no aterro sanitário, a resistividade diminui. Pelo posicionamento do perfil em relação ao local de descarte dos resíduos essas anomalias não sugerem vazamento, mas sim um acúmulo já esperado de líquidos

residuais, tendo em vista que os cacos de telha são colocados para que entre eles os líquidos possam fluir melhor indo em direção aos canais de coleta. Após os 90 metros, ao final da linha de aquisição, há pontos de resistividade bastante baixa que poderiam indicar alvos de investigação significativos, porém como estes pontos estão localizados na extremidade do perfil não há informações suficientes para tal análise. Por esta razão novas aquisições seriam necessárias em complemento ao perfil apresentado neste trabalho.

O terreno no qual foram realizadas as linhas de aquisição destes caminhamentos elétricos ocorrem matacões graníticos intemperizados. Isso pode explicar em parte as anomalias de alta resistividade, porém estas anomalias podem estar relacionadas ao acúmulo de outros materiais igualmente resistivos.

Os valores de condutividade não puderam ser comparados a dados de testes químicos que são feitos pelo DMAE nos poços de monitoramento anualmente.

8. CONCLUSÃO

O ensaio geofísico possibilitou a contextualização das zonas de resistividades distintas. A caracterização da área de baixa resistividade foi viabilizada somente após a comparação com os padrões de resistividade naturais ao ambiente geológico. Este é um procedimento essencial em qualquer estudo ambiental para a determinação de áreas anômalas comparando com os parâmetros físicos medidos pelos instrumentos. No entanto, a determinação dos teores de contaminação requer análises químicas em amostras de solo e água subterrânea para que possam ser estabelecidos de forma quantitativa e comparados com valores de referência recomendados por órgãos ambientais. Locais com maior probabilidade de concentração de contaminantes foram identificados nas seções de eletrorresistividade.

Os modelos geofísicos elaborados pelos valores de resistividade apresentaram cinco zonas de baixa resistividade. As ocorrências atingem valores de resistividade elétrica entre 156-44.2 $\Omega \cdot m$, sugerindo a possível presença de plumas de contaminação a jusante de áreas de depósitos de resíduos sólidos e líquidos. Este fluxo é justificável devido ao gradiente topográfico da área do aterro ser mais íngreme a nordeste devido ao alteamento dos taludes da plataforma e própria declividade do terreno. Recomenda-se que sejam feitas análises físico-químicas de amostras de solo e de água nos locais onde foram observadas as anomalias condutivas seções de eletrorresistividade, bem como o uso de outros métodos de investigação indireta para melhor interpretação do cenário geológico e ambiental da área de estudo.

As seções de eletrorresistividade comprovaram sua eficiência ao investigar o subsolo no aterro sanitário mesmo em condições pouco propícias. Os resultados permitiram associar os parâmetros de análise de corrente elétrica com os valores de resistividade, demarcando locais com maior suspeita de contaminação.

A integralização do contexto geológico, com a localização dos levantamentos em áreas de declividade do terreno permitiram avaliar o comportamento geoelétrico da área. Recomenda-se que sejam feitos mais estudos usando este mesmo método, assim como de técnicas de investigação ambiental adequadas, para complementar os dados obtidos pelo presente trabalho.

A instalação de piezômetros sobre os resíduos pode contribuir de forma substancial para o monitoramento do nível de chorume dentro do aterro. Isso possibilita a realização de balanços hídricos e estudos sobre a influência e a infiltração real de chorume em reservatórios de águas. Os dados obtidos dos piezômetros também fornecem informações diretas e precisas, complementando e validando os resultados obtidos por meio de técnicas indiretas ou de interpolação. Essa abordagem é essencial para o gerenciamento ambiental eficaz de um aterro. O aterro de Monte Carmelo possui quatro poços de monitoramento, de modo que apenas um está localizado sobre a plataforma. Neste sentido, recomenda-se a instalação de novos poços sobre as plataformas e de um laboratório no local que poderia fazer as análises *in loco* para nível de comparação (contraprova).

Além disso, outros métodos de monitoramento para averiguação de possíveis vazamentos podem ser adotados como, por exemplo, investigações com outros métodos geofísicos e amostragens de sondagens rotativas a trado, visto que as anomalias identificadas estão em pequenas profundidades. Estudos adicionais são necessários principalmente nas áreas em que foram observadas as anomalias de baixa resistividade, uma vez que estas ocorrem tipicamente em regiões com presença de contaminação.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos Sólidos: Classificação – NBR 10004.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Saúde desperdiçada, o caso dos lixões.** Brasil, 2015. 43p. Disponível em: abrelpe.org.br/pdfs/publicacoes/saude_desperdicada_o_caso_dos_lixoes.pdf. Acesso em: 13 de ago. de 2023.

ANNAN, A. P. **Ground penetration radar workshop notes.** [S.l.]: Sensors & Software Inc., 1992. p. 130.

BARDE-CABUSSON, S. et al. **Practical Approach for self-potential data acquisition, processing and visualization. Interpretation**, v. 9, p.123-143, 2021.

BARROS et al. (2022). Geoelectrical anomalies associated to groundwater contamination in Urânia (SP, Brazil). **Journal of Applied Geophysics**, v. 206, 2022.

BORTOLIN, J. R. M. Monitoramento temporal da pluma de contaminação do aterro controlado de Rio Claro (SP) por meio do método da eletrorresistividade. 2009.

BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUTTI, W. F. **Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos.** EngSanit Ambient, v. 15, n. 4, p 367 – 374, 2010.

BRAGA, A. C. O. **Geofísica Aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 157 p.

BRASIL. **Decreto.** 2022. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019_ . Acesso em: 25 outubro. 2022.

BRASIL. **Lei 12.305** de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. 1998.

BRASIL. **Secretaria de Qualidade Ambiental.** Plano nacional de resíduos sólidos. Brasília, 2022. 209 p.

CARRAZZA, Leonardo Paioli Identificação de cavidades em voçoroca por meio da aplicação do método geofísico da eletrorresistividade. **Tese de Mestrado**, Rio Claro, 2016.

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.

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

CODEMIG, COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta Geológica**: Folha Nova Ponte (SF.23-Y-C-I), escala 1:100.000, 2017.

CODEMIG, Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. **Mapa Geológico da Folha Estrela do Sul – SE.23-Y-A-IV**, Escala 1:100.000, 2017.

DMAE. **Relatório de Monitoramento Ambiental – janeiro de 2021 a dezembro 2021**. Aterro Sanitário de Monte Carmelo. Monte Carmelo, 2022.

EL MOUINE, Y. et al. Landfill pollution plume survey in the Moroccan Tadla using spontaneous potential. **Water**, v. 13, n. 7, p. 910, 2021.

ELIS, V. R.; BARROSO, C. M. R.; KIANG, C. H. Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do Sistema Aquífero Barreiras / Marituba em Maceió – AL. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 2, p. 2004.

FACHIN, S. J. S. **O sinal de potencial espontâneo em investigações ambientais: fatores que condicionam a amplitude de uma anomalia**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Acesso em: 09 jan. 2023.

FACHIN, Sergio Junior da Silva. **Geofísica Aplicada: métodos geoelétrico em hidrogeologia**. Tese (Doutorado) - Curso de Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG, Geofísica, Universidade de São Paulo – USP, 2007. 141p.

FARQUHAR, G.J. **Leachate: production and characterization.** 1989. Canadian Journal of Civil Engineering. nº16, p. 317 – 325.

FÉBOLI, W. L. 2017. **Monte Carmelo, Complexo.** In: Projeto Vazante-Paracatu - Geologia e recursos minerais das folhas Cabeceira Grande, Unái, Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo Patos de Minas. p. 60-67.

FÉBOLI, W. L.; PINHEIRO, M. A. P. **Carta Geológica: Folha SE.23-Y-A-V – MONTE CARMELO.** Escala 1:100.000. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2015.

FERREIRA, M. B. M.; SALLES, Alexandre O. T. Política ambiental brasileira: análise histórico-institucionalista das principais abordagens estratégicas. **Revista de Economia**, v. 43, nº 2, pp. 1-17, 2016.

FOIRE et al. **Integrated hierarchical geo-environmental survey strategy applied to the detection and investigation of an illegal landfill: A case study in the Campania Region (Southern Italy).** In: Journal Homepage: www.elsevier.com/locate/forsciint, Forensic Science International. 24 de agosto 2017.

GALLAS, J. D. F. **O método do potencial espontâneo (SP): Uma Revisão Sobre Suas Causas, Seu Uso Histórico e Suas Aplicações Atuais.** Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 134-144, 2005.

GALLAS, J. D. F. **Principais métodos geoelétricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental.** Tese de Doutorado, UNESP, Rio Claro, 259p.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, Fabio; MALAGUTTI FILHO, W. **Polarização induzida, resistividade e autopotencial: um caso histórico de avaliação de contaminação por vazamento de aterro.** 2010. 11 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2010.

GANDOLFO, O. C. B. 2007. Um estudo do imageamento geoelétricos na investigação rasa, **Tese de Doutorado**, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.234.

GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. 2007. O arranjo polo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 3, p. 227–235.

GEORGES, L. H.; GOMES, É. R. Diagnóstico ambiental do lixão do município de Pedro II–Piauí como ferramenta para a gestão de resíduos. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, v. 2, n. 2, 2021.

GUIRELI NETTO, L. **Análise de fluxo no interior de barragens de terra a partir do método do potencial espontâneo (SP)**. 2017. 88 f. Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2017. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/203217>. Acesso em: 06 abr. 2023.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**, 2021. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em: 11 de novembro de 2022.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Ortomosaico Projeto SPMGGO: 2453-3-SO e 2490-1-NO**. Escala 1:25.000. 2007.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 438 p.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **Geofísica de Exploração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. v. 1, p. 316.

LAGO, A. L.; ELIS, V. R.; GIACHETI, H. L. **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.

LIMA, O. A. L de. Propriedades Físicas das Rochas–bases da geofísica aplicada. **Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf)-Rio de Janeiro**, 2014.

LOKE, M. H. (2014). **Tutorial: 2-D and 3-D electrical Imaging surveys**. Surveys in Geophysics, 35(1), 135-161.

LOKE, M. H. 2004. **A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.** 136p. Disponível em: <http://www.geoelectrical.com/coursenotes.zip>, acessado em 20/07/2023.

LOKE, M.H. et al. **Recent developments in the direct current geoelectrical Imaging method.** Journal of Applied Geophysics, v. 95, p. 135-156, 2013.

LOKE, Meng Heng; BARKER, Ron D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1. **Geophysical prospecting**, v. 44, n. 1, p. 131-152, 1996.

MARESCOT, L., REVIL, A., & BECKIE, R. (2018). **Electrical methods for geothermal reservoir characterization: A review.** *Geothermics*, 72, 1-14.

MILSOM, J. Field geophysics: the geological field guide series. 3. ed. London: Wiley, 2003. 249p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Agenda ambiental urbana: programa lixão zero. Programa Lixão Zero.** Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/>. Acesso em: 9 de dezembro de 2022.

MOREIRA, C. A. et al. Caracterização geofísica em aterro de resíduos sólidos para avaliação de condicionantes de instabilidade geotécnica. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 43, n. 1, p. 23-32, 2013.

MOREIRA, C.A; DE OLIVEIRA, M. T.; DA SILVA, A. C. Estudo geofísico em aterro controlado disposto sobre rochas fraturadas. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 6, n. 2, p. 180-190, 2011.

NAUDET, V. et al. Groundwater redox conditions and conductivity in a contaminant plume from geoelectrical investigations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 8, n. 1, p. 8-22, 2004.

NAUDET, V.; REVIL, A. A sandbox experiment to investigate bacteria-mediated redox processes on self-potential signals. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 11, 2005.

NETO, A. C. de. S.; SIQUEIRA, F. R. P. S. de. Delimitação de nascente soterrada utilizando método da eletrorresistividade na cidade de Cuiabá, MT. **Revista do Instituto de Geociências**. São Paulo, v. 22, n. 3, p. 1-3, 2022.

NTARLAGIANNIS, D. et al. Microbial nanowires: Is the subsurface “hardwired”? **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 17, 2007.

OLIVAR ANTÔNIO LIMA DE OLIVEIRA, O. A. L. de. **Propriedades físicas das rochas: bases da geofísica aplicada**. Rio de Janeiro: Sbgf, 2014. 315 p.

ORELLANA E. 1972. **Prospección Geoelectrica en Corriente continua**. Ed. Paraninfo, Biblioteca técnica Philps, Madrid, 523p

PEREIRA, A.D.C. et al. **The garchy 1995-1996 electrode experiment - chapter 2: Physics and chemistry of electrodes for geophysical applications**. Technical Report, 221 p., 1998.

PORSANI, J. L. **Ground Penetration Radar (GPR)**: Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP. 1999. 145f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campos de Rio Claro- SP, 1999.

PORILHO, F. **Sustentabilidade ambiental, consumo e cidadania**. Cortez, 2005.

PRADO, R. L. **A sísmica de reflexão e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos**: Um estudo na cidade de São Paulo – SP. 2000. 174f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campos de Rio Claro- SP, 2000.

RADAMBRASIL, Projeto. **Levantamento de recursos naturais**. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Projeto Radambrasil, 1973.

RESÍDUOS Especiais. **Saúde desperdiçada, o caso dos lixões**. Brasil, 2015.

REVIL, A. et al. Understanding biogeobatteries: Where geophysics meets microbiology. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 115, n. G1, 2010.

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

RIGOTI, A. 1998. Exploração Geofísica Terrestre por Métodos Gravimétricos, Magnetométricos e Gamaespectrométricos. Curso de Aperfeiçoamento em Exploração Mineral (EXMIN 98) – ADIMB. 53 p.

SANTOS, A. C. O. et al. Estudos geoelétricos em aterro controlado no município de Caçapava do Sul–RS. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 99-112, 2014.

SASAKI, Y. 1992. **Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation.** Geophysical Prospecting, 40, 453-464.

SEER H. J., MORAES L. C., CARNEIRO A. C. 2007. **Geologia e deformação do Grupo Araxá na região de Estrela do Sul-Monte Carmelo-Abadia dos Dourados, Minas Gerais.** In: SBG, Simpósio de Geologia, Sudeste, 10:37.

SEER, H. J.; MORAES, L. C. 2013. **Magmatismo granítico Neoproterozoico de ambientes intraplaca, arco e colisão no Grupo Araxá, Faixa Brasília Meridional, Minas Gerais, Brasil.** Brazilian Journal of Geology, 43(2): 333-354

SHERIFF ER. 1989. Geophysical methods, Prentice Hall, chapter 9, **Electrical and Electromagnetic methods**, p. 192–200.

TELFORD W. M.; GELDART L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics.** Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, p. 770, 1990.

VALERIANO, C. de M. et al. A evolução tectônica da Faixa Brasília. **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução e obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.** Beca, São Paulo, p. 575-593, 2004.

VIEIRA, E. A. A questão ambiental do resíduo/lixo em Ribeirão Preto (SP). **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 170 p.-170 p., 2011.

XIE, J. et al. Numerical modeling of biogeobattery system from microbial degradation of underground organic contaminant. **SN Applied Sciences**, v. 2, p. 1-11, 2020.

XIE, J.; et al; **Numerical modelling of biogeobattery system from microbial degradation of underground organic contaminant.** SN Applied Sciences. v.2, n. 208, 2020.

ZAINÉ, J. E. **Método de Fotogeologia Aplicado a Estudos Geológico-Geotécnicos.** 2011.