# Aplicação da Eletrorresistividade para detecção de zonas de acumulação de Biogás em Aterro Sanitário

Victor Saulo Moreira[1], Jackson Alves Martins[1], Jonathan Lima Castelo Branco[1], Miguel Ângelo A.M. da Silva[1], Matheus Edson M. Medeiros[1], Raimundo Mariano G. Castelo Branco[1]
[1]Universidade Federal do Ceará (UFC).

*Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica*

*Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

**Resumo**

Aterros sanitários são espaços destinados ao despejo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no qual podem comercializar biogás como fonte de energia. O mesmo é produzido através da decomposição anaeróbica de material orgânico. Nessa pesquisa, empregou-se o uso do método geofísico da eletrorresistividade no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) no município de Caucaia-CE, com o objetivo de caracterizar os estratos geoelétricos e delimitar possíveis zonas de acumulo de biogás, direcionando assim a perfuração de novos poços de captação de biogás. Foram realizados 8 (oito) perfis de tomografia elétrica 2D (ERT) abrangendo todo o terreno do aterro sanitário além de um levantamento aerofotogramétrico permitindo uma melhor integração dos dados e precisão topográfica.

**Introdução**

Há uma crescente demanda energética mundial, ocasionando a necessidade de uma transição de matriz energética, isto é, trazer recursos energéticos de variadas fontes de energia além dos combustíveis fosseis como petróleo, gás natural e carvão mineral. Nesse contexto se intensificam pesquisas relacionadas ao uso de biogás como fonte de energia extraída de aterros sanitários, sendo uma forma sustentável e economicamente viável de se obter energia limpa.

A Norma Brasileira (NBR) 8.419/1992 define aterro sanitário como sendo uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança. O objetivo é minimizar os impactos ambientais, utilizando princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível (ABNT, 1992). Nesse contexto aterros sanitários se tornam objetos de interesse quanto a extração e comercialização de biogás, pois o biogás ou gás do lixo (GDL) é produzido a partir da decomposição anaeróbica da matéria orgânica. Estudos anteriores afirmam que cerca de 47,5% dos RSU do ASMOC são compostos por material orgânico (Linard, 2010), a média nacional em 2022 era cerca de 45% (ABRELPE, 2022).

A composição do biogás inclui os gases amônia ($NH_3$), dióxido de carbono ($CO_2$), monóxido de carbono (CO), hidrogênio ($H_2$), sulfeto de hidrogênio ($H_2S$), metano ($CH_4$), nitrogênio ($N_2$) e oxigênio ($O_2$). O metano representa 45 a 70% do biogás, seguido pelo dióxido de carbono (40-60%), nitrogênio (2-5%), oxigênio (0.1-1%), e os demais com menos que 1% (Tchobanoglous *et al.,* 1993). O potencial enérgico do biogás está diretamente relacionado ao percentual de metano presente em sua composição, devido seu potencial calorífico de cerca de 8.500 kcal/m³ (Alves, 2000). Moreira *et al.,* (2015) observou que zonas de maiores resistividades estavam associadas a presença de biogás, já o chorume se apresenta de forma condutiva Georgaki *et al.,* (2007).

A presente área de estudo está localizada no município de Caucaia-CE, zona metropolitana de Fortaleza, o aterro sanitário possui 78 hectares e esteve em funcionamento de 1991 a 2015, recebendo RSU dos municípios de Fortaleza e Caucaia. Há ausência de lençol freático raso no local, combinado com baixa permeabilidade do solo torna improvável a poluição das águas subterrâneas por infiltração de lixiviados (Oliveira, 2011). O objetivo principal do estudo desenvolvido é caracterizar os estratos geoelétricos e delimitar zonas de acúmulos de biogás no aterro sanitário, através do emprego do método geofísico da eletrorresistividade. Com isso, indicar zonas ideais para perfuração e instalação de novos drenos captadores de biogás, permitindo maior assertividade e consequente diminuição de gastos.

**Metodologia/ Problema Investigado**

Inicialmente foi realizado um levantamento aerofotogramétrico a partir de fotografias aéreas retiradas pelo drone *Phantom 4 pro,* produzido pela DJI. Já os pontos de controle foram coletados a partir do receptor GNSS (*Global navigation satellite system*) Trimble R4 no modo RTK (*real time kinematic*), permitindo uma posterior correção topográfica dos produtos gerados a partir da aerofotogrametria. O processamento das imagens foi realizado pelo programa *Agisoft Metashape Professional.*

Posteriormente seguiu-se para a aquisição geofísica, onde foram realizados 8 (oito) perfis geoelétricos utilizando a técnica Tomografia Elétrica (figura 1). Todos os perfis foram realizados com o arranjo dipolo-dipolo, sendo 4 (quatro) com espaçamento dos eletrodos de 5 metros e outros quatro com espaçamento de 10 metros. os perfis concentraram-se na região central do aterro, onde há uma tendência de concentração do biogás, possibilitando analisar todas as camadas da base ao todo do mesmo.

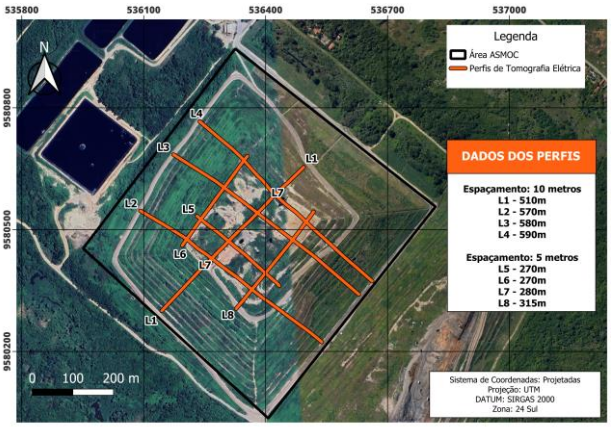


*Figura 1 - perfis geofísicos realizados no ASMOC e relação das seções com o espaçamento dos eletrodos*.

A etapa de aquisição de dados em campo foi realizada durante os meses de fevereiro e março de 2021. O equipamento utilizado para aquisição geofísica foi o *SuperStingR8 IP* desenvolvido pela *AGI Advanced Geosciences, inc.* Os dados obtidos em campo foram submetidos a uma modelagem 2D em laboratório, por meio do *software Earthimager2D* além do *software Res2Dinv*, gerando seções bidimensionais de resistividade aparente (distância x profundidade). O processamento gerou seções com valores de resistividade real através do procedimento de inversão geofísica. A alta densidade de informações de resistividade na subsuperfície do aterro sanitário permitiu uma boa acurácia para interpretação e integração dos dados adquiridos em campo. Utilizou-se do MDT para produção de um modelo 3D do aterro sanitário gerado no *software Leapfrog,* possibilitando a integração do modelo 3D com os perfis geofísicos.

**Resultados**

O processamento das imagens aéreas permitiu gerar o ortomosaico e Modelo Digital De Terreno (MDT) do ASMOC, estes produtos serviram para elaboração do planejamento geofísico bem como para integração final dos dados com precisão topográfica centimétrica (figura 2).

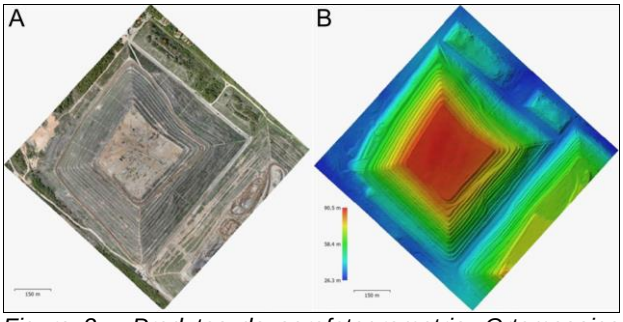


*Figura 2 – Produtos da aerofotogrametria, Ortomosaico (A) e Modelo Digital de Terreno (B).*

Os modelos de inversão elétrica de resistividade 2D gerados a partir dos dados de tomografia elétrica (ERT), são apresentados em valores com escala logarítmica permitindo uma análise comparativa entre seções. Os perfis apresentaram o erro médio quadrático (RMS) entre 4,79% e 13,24%, evidenciando uma ótima qualidade nos dados adquiridos. Após a inversão dos dados, foi realizado a interpretação de cada seção de eletrorresistividade separando-os em relação ao espaçamento dos eletrodos, o grupo 1 corresponde aos perfis com 5 metros de espaçamento e o grupo 2, 10 metros.

Os perfis do grupo 1 (L5, L6, L7 e L8), foram adquiridos com espaçamento dos eletrodos de 5 metros visando uma melhor resolução lateral e vertical, abrangendo a porção mais rasa/intermediária (subsuperficial) do aterro sanitário. Dessa forma alcançando maior detalhamento de possíveis estruturas relacionadas ao acumulo de biogás. Os perfis apresentaram comprimentos entre 265 até 310 metros, a profundidade investigada foi de aproximadamente 60 metros para estas seções. os valores de resistividade situaram entre 2,8 a 111 *ohm.m*. Os perfis apresentaram, nas porções superficiais (níveis mais rasos), valores mais resistivos em tonalidades verde-amarelo/ avermelhadas. Essa zona resistiva ocorre ao longo de toda seção (exemplo da linha 07) na forma de faixa sub-horizontal com espessura aproximada de 10 (dez) metros, situando-se entre a cota 90 e 80 metros, ora apresentando tonalidades mais avermelhadas (maior resistividade), ora de forma mais discreta, em tons amarelado e esverdeado (figura 3). Em seguida, observou-se outra zona contrastante comum a todas as seções, sendo a presença de regiões muito condutivas, representada pela tonalidade azul escuro nos perfis de tomografia elétrica 2D. Estas zonas surgem em cotas mais profundas (75m), logo abaixo das zonas mais resistivas destacadas anteriormente, apresentando geometria alongada e sub-horizontalizada ao longo das seções, destaque para o perfil L6 (figura 4). Valores abaixo da cota de 75 metros até as regiões mais profundas apresentaram um comportamento homogêneo de caráter condutivo-intermediário, são tonalidades em azul geralmente mais claros.

Os perfis do grupo 2 (L1, L2, L3 e L4), foram realizados com espaçamento de 10 metros entre os eletrodos, permitindo maior profundidade de investigação. Estes, apresentaram variação de 510 a 590 metros, alcançando profundidades de até 110 metros para tais seções. Observou-se um caráter muito condutivo predominante ao longo de todas as seções, com valores variando entre 1,3 e 90 *ohm.m*. Foi possível verificar que zonas mais resistivas não ficaram tão evidentes como no grupo 1 (figura 5), isso se deve a queda de resolução em regiões mais rasas causadas pelo maior espaçamento dos eletrodos.

A Figura 6 demonstra a distribuição das seções geofísicas ao longo do modelo 3D do ASMOC, permitindo maior entendimento do comportamento geoelétrico no aterro sanitário.

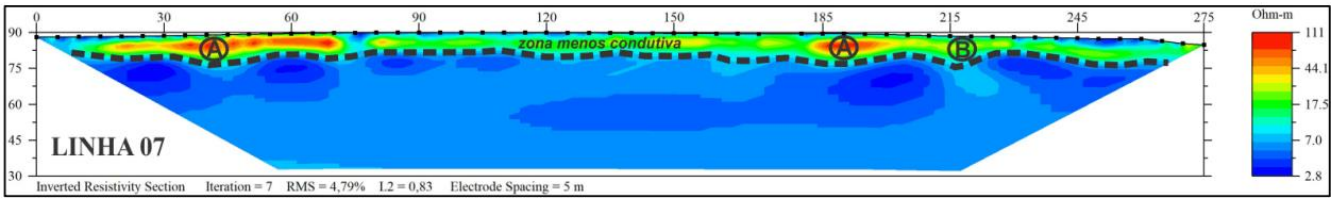


*Figura 3: Tomografia elétrica do perfil L7 destacando a zona menos condutiva ocorrendo ao longo de todo o perfil (tracejado em preto). Destaque para subdivisão entre zonas com valores mais elevados (A) em comparativo às outras zonas mais discretas (B).*

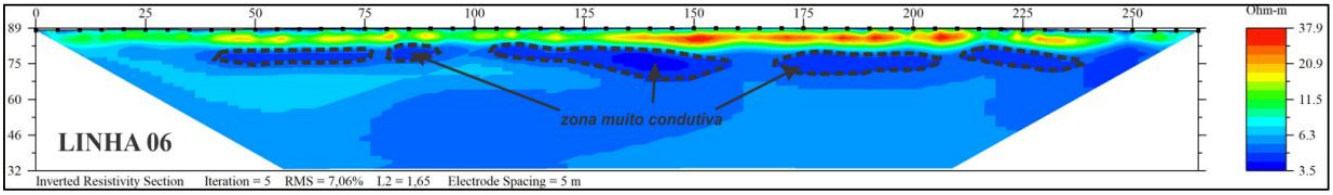


*Figura 4:Tomografia elétrica do perfil L6, destacando regiões muito condutivas que ocorrem ao longo de todo o perfil (tracejado em preto). Destaque para o caráter também raso destas zonas e a forma de bolsões alongados sub-horizontais.*

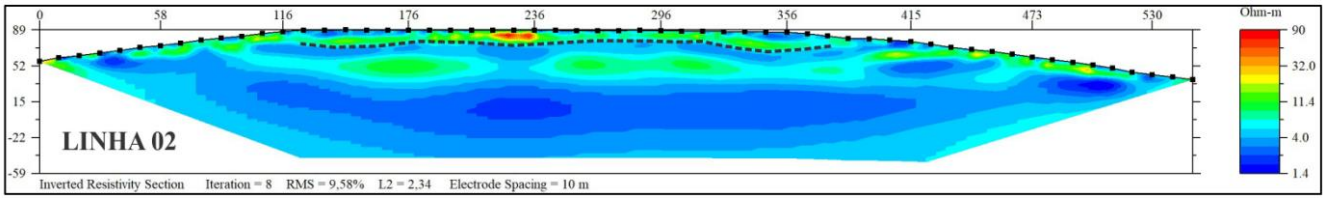


*Figura 5: representação da seção L2, destacando faixa de maior resistividade que ocorre ao longo do perfil (tracejado em preto), na posição 226 metros ocorre uma zona de maior resistividade (avermelhado)*

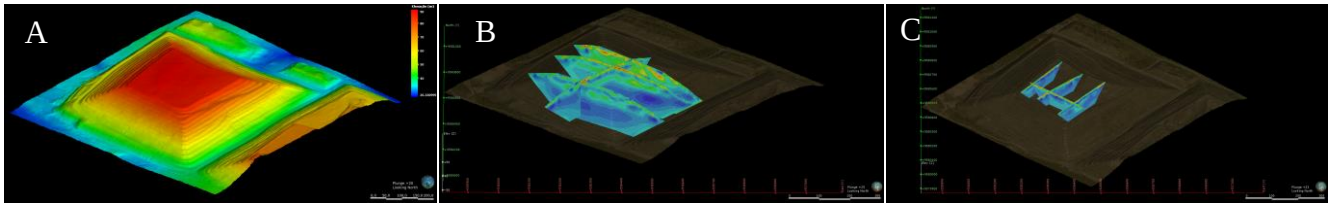


*Figura 6: Modelo tridimensional do ASMOC, extraído a partir do MDT onde cores quentes representa zonas de maiores altitudes topográficas (A), perfis de ERT espacializados sobre o aterro, perfis com espaçamento de 10 metros (B) e 5 metros (C).*

## Discussão e Conclusões

Ao todo foram realizados 3.385 metros lineares de aquisição geofísica divididos entre oito perfis de tomografia elétrica. O padrão geral de resistividade nas seções geofísicas foi a existência de um ambiente fortemente condutivo com valores máximos de 111 *ohm.m,* justificado pela ocorrência de resíduos e material orgânico, provavelmente influenciado pela presença de chorume.

Os perfis com espaçamento de 10 metros (L1, L2, L3 e L4) delimitaram muito bem o caráter condutivo do aterro sanitário, possibilitando leituras mais profundas. As margens do aterro (taludes) caracterizaram a presença de zonas extremamente condutivas podendo estar associado ao acúmulo e possível migração de pluma de chorume para a região central do aterro. Todos os 4 perfis apresentaram uma zona rasa com caráter mais resistivo do que o padrão observado no aterro, essa zona se estende ao longo das seções de forma alongada com uma tendência horizontal, sendo melhor abordada nos perfis de menor espaçamento (maior detalhe).

As seções L5, L6, L7, L8 foram limitadas somente ao topo do aterro, com espaçamento de 5 metros entre os eletrodos, possuindo maior detalhamento em profundidades mais rasas. O estrato subsuperficial é definido pela ocorrência de uma faixa sub-horizontal alongada com caráter mais resistivo (cores quentes), esse caráter pode estar relacionado a influência da camada de cobertura do aterro, sendo de forma preliminar associado a influência da presença do biogás neste nível de investigação. Em relação às zonas muito condutivas, observou-se que ocorrem em forma de bolsões alongados ou arredondados com tendência sub-horizontal, apresentando valores extremamente baixos (aproximadamente 1 a 5 *ohm.m*). Usualmente ocorrem logo abaixo de zonas menos resistivas, sendo estas feições interpretadas como zonas de acumulo de chorume, justificado pelo caráter altamente condutivo do mesmo.

A geofísica através do método da Tomografia Elétrica (ERT) se provou eficaz no mapeamento e diferenciação entre zonas muito condutivas, intermediárias e pouco condutivas associadas, respectivamente, ao chorume, a composição geral do aterro e ao biogás.

Por fim, a modelagem 3D (aerofotogrametria) apresentou resultado satisfatório, permitindo uma melhor visualização (distribuição) dos perfis geofísicos e integração dos dados, facilitando a compreensão espacial e visualização das respostas geofísicas do aterro sanitário (figura 6).

## Agradecimentos

Agradeço ao Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR) e aos meus orientadores por todo suporte oferecido, aos companheiros de pesquisa que ofereceram todo o tipo de suporte necessário para realização deste estudo em questão.

## Referências

ABRELPE, Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2022.

ALVES, J. W. S. (2000). Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos. São Paulo. Dissertação de Mestrado. PIPGE / USP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992

GEORGAKI, Irene et al. Evaluating the use of electrical resistivity imaging technique for improving CH4 and CO2 emission rate estimations in landfills. Science of the total environment, v. 389, n. 2-3, p. 522-531, 2008.

G. Tchobanoglous, H. Theisen, and S. Vigil, Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, New York, 1993.

LINARD, A. de F. G. Análise do aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário metropolitano oeste em Caucaia sob a perspectiva do mecanismo de desenvolvimento limpo. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

Moreira, C. A., Munhoz, T., Cavallari, F., & Helene, L. P. I. (2015). Electrical resisitivity to detect zones of biogas accumulation in a landfill. Geofísica internacional, 54(4), 353-362.

OLIVEIRA, Cláudio André Almeida de. Análise do fluxo de gases na camada de cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC). 2011.