Estudo da contaminação em aterro de resíduos urbanos com método eletromagnético no Domínio da Frequência

Elis, V.R.[1], Barros, M.F.S.[1], Stangari, M.C.[1], Leonardo, N.[1], Mondelli, G.[2], Juarez, M.B. [2], Giachetti, H.L.[2]
[1] Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP.
[2] Universidade Estadual Paulista, UNESP/Bauru

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

Este trabalha apresenta os resultados da aquisição de dados de condutividade com o equipamento EM Domínio da Frequência para estudo da contaminação causada por um aterro controlado desativado na cidade de Bauru – SP, instalado sobre arenitos da Formação Marília. Os dados obtidos foram tratados com software de inversão. Os dados de EM foram coletados em 2011, na época de aprovação do plano de encerramento do aterro. Esses dados na época não foram tratados por método de inversão, sendo a análise feita apenas pela plotagem dos mapas de condutividade aparente. Com a disponibilidade de software de inversão, as linhas de ensaio foram submetidas a rotina de inversão gerando perfis de condutividade e profundidades interpretadas, possibilitando uma interpretação mais refinada. Os resultados da interpretação dos dados geofísicos foram integrados a informações de poços de monitoramento, o que possibilitou identificar e mapear os locais com resíduos e com suspeita de contaminação, bem como definir as condicionantes do meio físico que interferem no processo de fluxo de contaminantes. Os resultados mostram que a metodologia geofísica foi eficiente no imageamento das fontes de contaminação e das áreas afetadas, mesmo quando a contaminação não era intensa.

Introdução

A disposição de resíduos (tanto domésticos quanto industriais) é considerada, globalmente, uma das principais fontes potenciais de contaminação de água subterrânea, entre outros tipos de atividades e empreendimentos antrópicos. O aumento dos problemas ambientais e a consequente busca de novos métodos de análise do comportamento e da possibilidade de preservação do meio físico resultaram na necessidade de aprimoramento das técnicas existentes e a utilização de novas ferramentas de investigação, que possibilitem análises rápidas e eficientes. Como método de estudo para a caracterização dos efeitos de contaminantes no meio pode ser enquadrado o uso de Geofísica. A natureza não invasiva dos métodos geofísicos (não afeta e não destrói camadas selantes naturais ou artificiais), aliada ao baixo custo operacional, rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios, torna-os uma excelente ferramenta para ser aplicada em estudos ambientais. A utilização de geofísica na caracterização de uma área afetada por substâncias poluentes consiste, basicamente, na detecção e mapeamento da extensão da área afetada, com informações sobre a profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo e profundidade do substrato rochoso inalterado. Uma justificativa ainda mais forte para a aplicação da geofísica, além das citadas acima, é que algumas técnicas fornecem dados contínuos sobre o local estudado, reduzindo, portanto, a necessidade de dados diretos e específicos. No caso deste trabalho em particular, a aplicação do método EM mostra-se mais interessante em razão da rapidez da coleta de dados em uma área bastante extensa, de cerca de 500 x 400 metros.

Área de Estudo

O Aterro Sanitário de Bauru, Estado de São Paulo, está localizado a 15 Km do centro da cidade. A área está localizada na Bacia Sedimentar do Paraná, caracterizada por arenitos do Grupo Bauru, representados pelas formações Adamantina (inferior) e Marília (superior). Localmente, os arenitos são sobrepostos por solos aluviais e colúvio. O solo superficial consiste em uma areia silto-argilosa. Sob estes materiais estão os solos residuais de arenito do Grupo Bauru, caracterizados por areia muito argilosa. O aterro tem 268,985 m2 de área e opera desde 1993. Os resíduos foram dispostos inicialmente em 3 camadas de aproximadamente 4 m de altura, e sua parte inferior possui uma camada de emulsão de asfalto sobre o solo local compactado de textura argilo-arenosa. Análises da qualidade da água de drenagem próxima do aterro apresentaram alterações, o que sugeriu que o sistema de impermeabilização era ineficiente. Em 2011, o plano de encerramento do aterro foi aprovado pela CETESB, incluindo a reconformação da quarta e da quinta camada e uma área adjacente de expansão (BAURU, 2015). A desativação oficial ocorreu em 2016. Várias pesquisas foram realizadas no local integrando ensaios de laboratório, de campo e métodos geofísicos e identificaram contaminação devido à migração de chorume para o subsolo, (Lago, 2006; Mondelli et al., 2007; Ustra et al., 2012; Faria et al., 2017, 2020).

Metodologia

O método Eletromagnético Domínio da Frequência (*Frequency Domain Electromagnetics - FDEM*) ou Método EM Indutivo utiliza a condutividade aparente do terreno no estudo da contaminação. O equipamento utilizado é o Geonics EM34, composto uma bobina transmissora Tx e uma bobina receptora Rx. Essas bobinas permitem três diferentes configurações de

frequências e espaçamentos, que se relacionam com diferentes profundidades de exploração. A disposição das bobinas também é possível de duas maneiras, o que influi na profundidade teórica de exploração. A aquisição com as duas bobinas dispostas na vertical (modo VL, *Vertical Loop*) apresenta uma profundidade de exploração de aproximadamente 0,75 vezes o espaçamento. O modo HL (*Horizontal Loop*) permite uma profundidade de exploração teórica de 1,5 vezes o espaçamento entre bobinas. Este método EM tem as vantagens de ser versátil, rápido, permitir a leitura para diversas profundidades, apresentar bons resultados para condutividade e não ter problemas com injeção de corrente. Porém, apresenta um limite estreito na faixa de medida, possui capacidade de sondagem vertical limitada e o campo eletromagnético utilizado pelo equipamento interage com estruturas metálicas e fios de alta tensão (McNeill, 1980). A propriedade envolvida no Método EM Indutivo é a condutividade elétrica (σ), que é inversamente proporcional à resistividade elétrica (*ρ*).

Ao aplicar uma corrente alternada na bobina transmissora, gera-se um campo magnético primário, H_p (ou indutor), que se propaga no espaço acima e abaixo da superfície e induz correntes em corpos condutores. Correntes circulares produzidas em condutores em subsuperfície produzem campos magnéticos secundários, H_s, que distorcem o campo magnético primário.

A amplitude das ondas eletromagnéticas decresce exponencialmente ao atravessar corpos condutores. A profundidade para qual a amplitude se reduz a 1/e em relação ao seu valor na superfície é conhecido como "*skin depth*" (δ). Para ondas planas que atravessam um condutor não magnético o "*skin depth*" é:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \text{ (metros) (1)}$$

$\omega = 2\pi f$ e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

A razão do espaçamento entre as bobinas (*s*) dividido pelo "*skin depth*" é conhecido como o "número de indução" (B). Quando o número de indução é muito menor que um, a razão entre H_s e H_p no receptor é diretamente proporcional à condutividade aparente (σ_a). Nessa condição especial de operação do EM34, conhecida como "aproximação de baixo número de indução", o valor do campo resultante, medido pela bobina receptora, pode determinar a condutividade de corpos em subsolo. A condutividade aparente é calculada através da seguinte expressão:

$$\sigma_a = \frac{4}{2\pi f \mu_0 s^2} \times \frac{H_s}{H_p} \text{ (mS/m) (2)}$$

A condutividade aparente é assim denominada por se referir a condutividade de um pacote geológico da superfície até a profundidade investigada. A interpretação dos resultados em termos de condutividade aparente e profundidades teóricas de exploração apresenta várias limitações na definição da geometria e posição de corpos e camadas geológicas, bem como de estruturas antrópicas. Os programas de inversão possibilitam uma definição mais precisa e realística das feições estudadas.

Para a interpretação dos dados deste trabalho foi utilizado o programa de inversão denominado EM34-2D (Monteiro Santos, 2004). Este programa utiliza o algoritmo de inversão não linear apresentado em Sasaki (1989). O algoritmo usa uma técnica de inversão regularizada com vínculo de suavidade para dados eletromagnéticos adquiridos ao longo de perfis. O algoritmo corresponde a uma inversão 1D modificada com restrições de suavidade 2D entre modelos 1D adjacentes. O modelo plano para Terra utilizado no processo de inversão dos dados consiste em conjunto de blocos, cuja distribuição e o tamanho depende da localização e o espaçamento entre as bobinas utilizadas na aquisição dos dados. Assim, é possível obter a resposta em termos da variação da condutividade elétrica e profundidades reais para os pontos de medição que, interpolados, permitem a criação de uma imagem 2D.

Aquisição de Dados e Resultados

O Método EM indutivo é especialmente interessante no estudo de áreas relativamente extensas, em razão da rapidez de aquisição dos dados. Isso permite cobrir uma grande área com boa malha de dados de forma rápida. No caso do Aterro Bauru, que tem dimensões aproximadas de 550 por 500 metros (área preenchida com resíduos e mais os entornos) fica patente a necessidade de um método de rápida aquisição de dados para permitir uma cobertura adequada da área. Neste trabalho foram executadas nove linhas de ensaio com o EM34 com espaçamento de 20 metros entre bobinas nos modos VL e HL, com profundidades de exploração teóricas de 15 e 30 metros, respectivamente. Esses ensaios foram executados em 2011, na ocasião de aprovação do projeto de encerramento do aterro. O mapa com as linhas de ensaios geofísicos, bem de outras fontes de dados diretos existentes no local, é apresentado na **Figura 1**. Os nove perfis geofísicos foram executados de forma a cobrir toda a área e seus entornos imediatos.

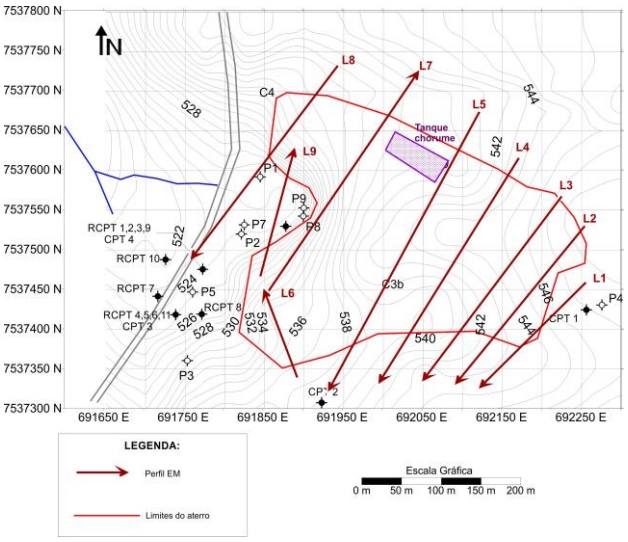

***Figura 1** – Mapa da área com a localização dos ensaios geofísicos.*

Para uma análise geral do problema, foram construídos os mapas de condutividade aparente dos níveis 15 e 30 metros (VL e HL, respectivamente). De acordo com Mondelli (2004) o nível d´água a montante (Poço P4) estava posicionado a 30 metros de profundidade e de 6,2 a 7,5 a jusante (Poços P1, P8 e P9). Dessa forma o mapa VL tende a investigar o corpo de resíduos e a zona não saturada (**Figura 2**).

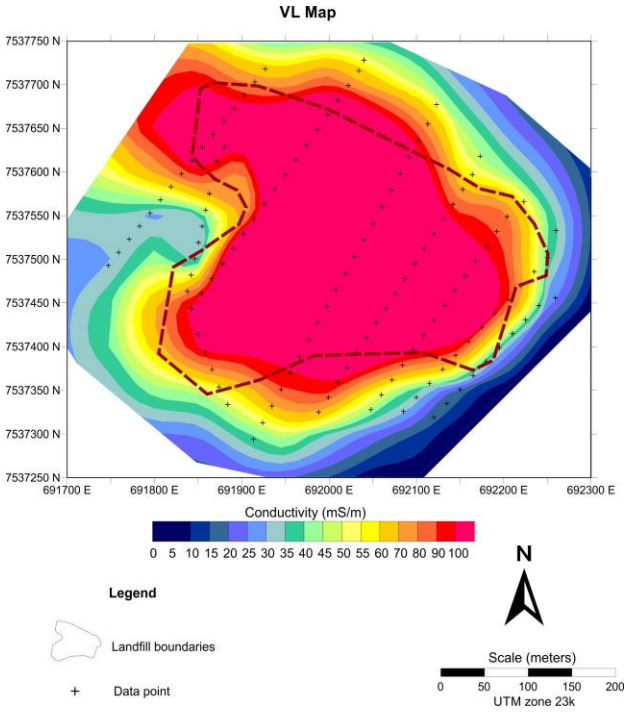

***Figura 2** – Mapa de condutividade aparente para o Modo VL.*

O mapa HL tende a investigar uma faixa com maior influência da zona saturada e possível (**Figura 3**). É possível observar uma possível pluma se desenvolvendo no sentido WNW.

A presença dessa possível pluma é concordante com estudos anteriores (Mondeli, 2004; Lago 2004; Ustra et al., 2012). A alteração nos parâmetros físico químicos das águas subterrâneas é observada nos poços P1, P8 e P9.

O sentido de fluxo subterrâneo, de leste para oeste, apresenta uma anomalia característica de alta condutividade aparente (valores superiores a 45 mS/m no mapa do modo HL) alongada aproximadamente Leste-Oeste. O modelo digital do terreno de 1992 apresenta na **Figura 4** (Mondelli et al, 2007), antes da implantação do aterro, mostra claramente que existia uma zona mais baixa alongada no sentido Leste-Oeste que atualmente é ocupada pelos resíduos. Essa zona coincide com a anomalia de baixa resistividade, indicando que o fluxo de água e contaminantes está condicionado ao relevo anterior aos resíduos, sugerindo que os contaminantes tendem a se concentrar nessa zona e fluir no sentido oeste.

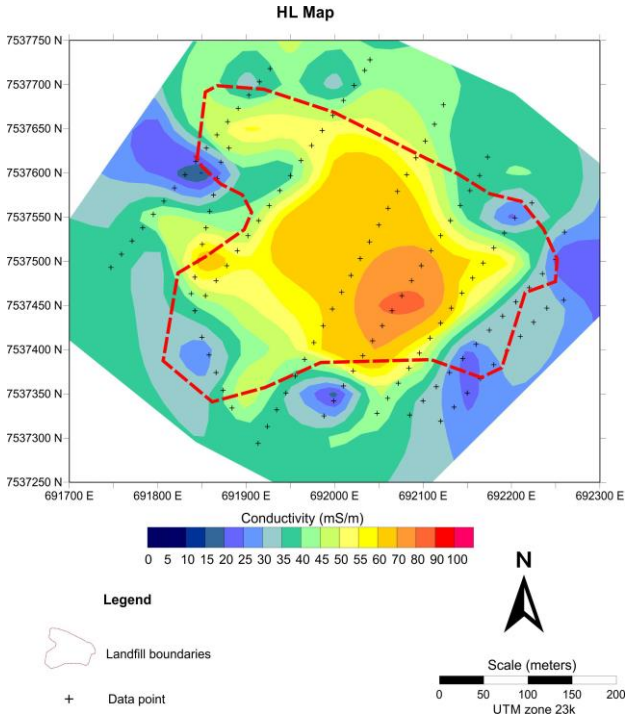

***Figura 3** – Mapa de condutividade aparente para o Modo HL.*

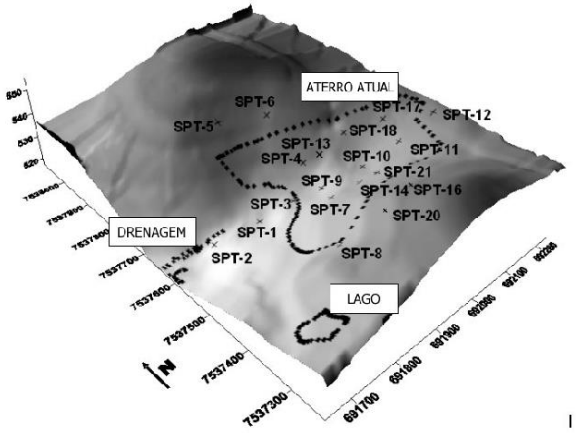

***Figura 4** – Modelo Digital do Terreno de 1992, antes da implantação do aterro (Mondelli et al., 2007).*

Como já referido anteriormente, o uso de programas de inversão possibilita uma definição mais precisa e realística das feições estudadas, com uma melhor definição da geometria e posição de corpos e camadas geológicas, bem como de estruturas antrópicas.

Com esse objetivo, foram interpretadas por meio de software de inversão uma linha que cruza o corpo de resíduos e duas linhas mais a jusante.

A Linha 5 (**Figura 5**) permite observar claramente a cava preenchida com resíduos e chorume, com altos valores

de condutividade, superiores a 60 mS/m e atingindo valores maiores que 100 mS/m. Nessa linha é possível observar também o meio natural não afetado pela contaminação, que apresenta condutividade baixa.

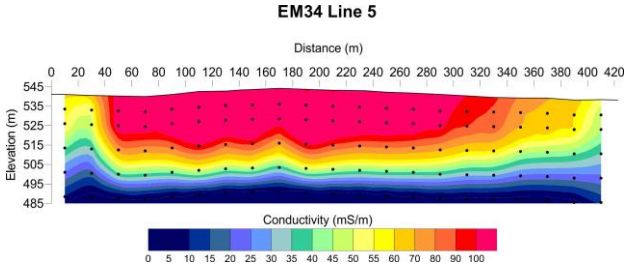

Figura 5 *– Perfil interpretado da Linha 5.*

A Linha 8 (**Figura 6**) foi executada em parte em cima dos resíduos (parte norte do perfil) e parte no terreno a jusante da área. Nessa linha é possível também observar a área preenchida com resíduos e chorume, com altos valores de condutividade, superiores a 60 mS/m. Na parte final do perfil é possível observar zonas mais condutoras em profundidade, indicando a presença de contaminação.

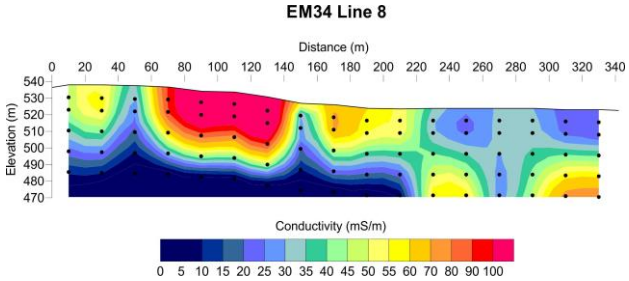

Figura 6 *– Perfil interpretado da Linha 8.*

A Linha 9 (Figura 7) foi executada na posição a jusante, bem na frente do corpo de resíduos. É possível observar as laterais condutoras em razão da presença de resíduos na parte mais superficial e também zonas condutoras em profundidade (entre as posições 60 e 120 metros do perfil) indicando a presença de contaminação.

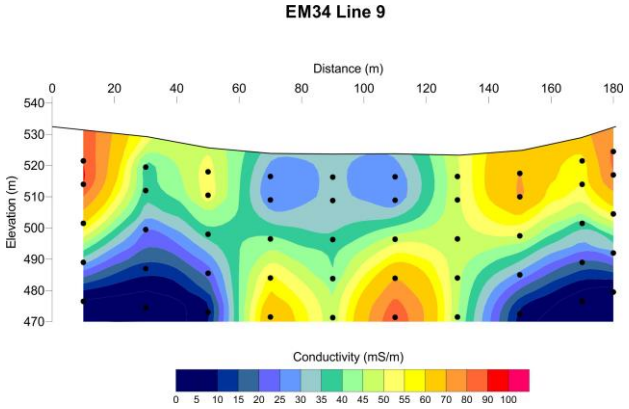

Figura 7 *– Perfil interpretado da Linha 9.*

Essas anomalias das linhas 8 e 9 são concordantes com a zona condutora observada no mapa do modo HL. Essa zona condutora é confirmada como zona contaminada por Mondelli et al. (2016) a partir de dados obtidos em poços de monitoramento. Os valores de resistividade da água dos poços de jusante (P1, P2 e P9) obtidos em 2011 foram respectivamente de 19 ohm.m (52 mS/m), 17 ohm.m (59 mS/m) e 37 ohm.m (27 mS/m). O poço P13, posicionado fora da área do aterro a Norte, considerado de referência, apresentou o valor de 104 ohm.m (9,6 mS/m). Ustra et al. (2012) constataram nos poços de jusante altas concentrações de *Escherichia Coli* e coliformes totais, acima do máximo valor permitido. Além dos constituintes bacteriológicos, os poços apresentaram altas concentrações de sulfato, ferro, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), evidenciando a pluma oriunda do aterro.

Conclusões

O trabalho mostra os resultados do mapeamento das zonas de influência da contaminação gerada pelo aterro controlado, com anomalias de alta condutividade. Os resultados do processo de inversão dos dados de condutividade mostraram o potencial do uso deste método EM Domínio da Frequência na avaliação da área do aterro controlado. A linha de ensaio que atravessa a cava com resíduos mostra que os resultados permitem delinear bem a área dos resíduos, com valores muito altos de condutividade, e o meio natural caracterizado por baixos valores de condutividade. Os perfis executados na região de jusante mostram anomalias condutoras dentro da zona saturada, indicando a alteração da condutividade das águas subterrâneas devido a infiltração do percolado. Essas zonas identificadas pela geofísica são concordantes com a área contaminada definida em trabalhos anteriores, com métodos indiretos e diretos. A integração dos resultados geofísicos, as informações de poços e modelo digital do terreno anterior a instalação do aterro indicam que a contaminação que atinge a zona saturada é condicionada pela antiga topografia do local.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (proc. 307272/2021-4)

Referências

Bauru (2015). Área ampliada do Aterro Sanitário de Bauru inicia operação nos próximos dias. Disponível em: < https://www2.bauru.sp.gov.br/materia.aspx?n=21233>. Acesso em: 07 fev. 2024.

Faria, G. M. M., Mondelli, G. (2017). Interaction between municipal solid waste leachate and Bauru aquifer system: a study case in Brazil. Environmental Science and Pollution Research, v. 24, p. 27553-27572.

Faria, G. M. M., Mondelli, G. (2020). Temporal behavior analysis of leachate contamination in a tropical landfill. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, p. 39584-39606.

Lago, A. L. (2004) Aplicação integrada de métodos geofísicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru – SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, São Paulo – SP.

Lago, A. L., Elis, V. R., Giachetti, H. L. (2006). Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru – SP. Revista Brasileira de Geofisica, v. 24, p. 357-374.

McNeil, J. D. (1980) Technical Note TN-6: Eletromagnetic terrain conductivity measurement at lowinduction numbers. Geonics Limited. Ontario, Canada: 15p.

Mondelli, G. (2004). Investigação geoambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo - SP. 264p.

Mondelli, G., Giacheti, H. L., Boscov, M. E. G., Hamada, J. (2007). Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. Environmental Geology, v. 52, n.5, p. 871-887.

Mondelli, G. (2008). Integração de diferentes técnicas de investigação para avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos - SP. 392p.

Mondelli, G., Giacheti, H. L., & Hamada, J. (2016). Avaliação da contaminação no entorno de um aterro deresíduos sólidos urbanos com base em resultados de poços de monitoramento. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.21, p.169-182.

Monteiro Santos, F.A., 2004. 1D laterally constrained inversion of EM34 profiling data. Journal of Applied Geophysics 56: 123-134. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2004.04.005

Sasaki, Y., (1989). Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole–dipole resistivity data. Geophysics 54, 254– 262.

Ustra, A. T., Elis, V. R., Mondelli, G., Zuquette, L. V., & Giacheti, H. L. (2012). Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil. Environmental Earth Sciences, v. 66, p. 763-772.

.