

# APLICAÇÃO DO MÉTODO DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA EM ATERRO CONTROLADO

César Augusto MOREIRA <sup>1</sup> & Antonio Celso de Oliveira BRAGA <sup>2</sup>

(1) Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. Caixa Postal 178. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: cesargeologia@yahoo.com.br

(2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. Caixa Postal 178. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: acobraga@rc.unesp.br

Introdução  
Interação Entre o Solo e Contaminantes Gerados em Aterros  
Caracterização da Área de Estudos  
Método  
Resultados  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – A geofísica aplicada em estudos ambientais é uma alternativa viável e promissora diante da demanda crescente por novas técnicas de investigação, essencialmente na caracterização e monitoramento de áreas contaminadas. Este trabalho apresenta os resultados de aplicação do método Polarização Induzida (IP), por meio da técnica de caminhamento elétrico, para determinação da área de percolação de material lixiviado proveniente de aterro de resíduos sólidos domiciliares do tipo vala. Os resultados sugerem uma associação entre anomalias de alta cargabilidade e prováveis acumulações de minerais férricos na base das valas de resíduos recentemente fechadas, em contraste com valas mais antigas, onde a cargabilidade tende aos valores naturais para a área.

**Palavras-chave:** Polarização Induzida, resíduos sólidos, cargabilidade, mineralização, geoquímica.

**ABSTRACT** – C.A. Moreira & A.C. de O. Braga - Polarization induced applied in solid waste landfill. The applied geophysics in environmental studies is a viable and promising alternative forward of the demand crescent for new techniques of investigation, essentially in the characterization and monitoring of contaminated areas. This work presents the results of application of the Induced Polarization method (IP), by means of the electrical profiling technique, for determination area of leached percolating proceeding from solid waste landfill the ditch type. The results suggest an association between high chargeability anomalies and probable ferric mineral accumulations in the base of the recently closed residues ditches, in constrante with older ditches, where the chargeability tends to the natural values for the area.

**Keywords:** Induced Polarization, solids waste, chargeability, mineralization, geochemistry.

## INTRODUÇÃO

A avaliação de contaminações geradas em aterro sanitários envolve uma análise ambiental integrada. Os aspectos fundamentais a serem analisados envolvem a caracterização hidrogeológica, pedológica e geológica.

O acompanhamento de contaminantes eventualmente presentes requer sua detecção, caracterização, monitoramento e prognóstico relativos à direção de fluxo e possíveis efeitos ao ecossistema.

A aplicação de métodos geofísicos em estudos ambientais é crescente, essencialmente para caracterização e o monitoramento de áreas contaminadas, devido à demanda por novas técnicas de investigação ambiental. Tais métodos são caracterizados como formas indiretas de investigação, por meio de medidas de propriedades físicas intrínsecas aos materiais geológicos, como resistividade elétrica, cargabilidade, propa-

gação de ondas eletromagnéticas, ondas mecânicas, energia térmica, campo magnético, dentre outras.

A possibilidade de aquisição de dados geofísicos em grande escala a um custo relativamente baixo, permite sua aplicação em estudos ambientais, preferencialmente integrados a técnicas diretas de investigação. Entretanto, na ausência de dados diretos, os métodos geofísicos são uma alternativa no diagnóstico de áreas sob suspeita de contaminação devido a alterações em propriedades físicas do ambiente impactado.

Na caracterização geoquímica e geofísica do aterro sanitário municipal de Camacchio (Itália), Abu-Zeid et al. (2004) utilizam as técnicas de tomografia elétrica e polarização induzida, na tentativa de esclarecer a resposta IP geralmente observada em aterros e suas áreas adjacentes. Diversas análises químicas

em amostras de água subterrânea coletadas na área do aterro descrevem grandes quantidades de metais dissolvidos, sob a forma de partículas metálicas insolúveis, possivelmente devido aos resíduos estarem em contato com o nível freático. Resultados obtidos sobre os intervalos com resíduos indicam baixos valores de resistividade e elevados valores de cargabilidade. Os autores interpretam esta associação ao comportamento a presença de metais dissolvidos, que se comportam como condutor eletrônico de corrente e pelo ocorrência do fenômeno de polarização eletrônica.

Em estudo realizado em duas áreas de disposição de resíduos domiciliares por Cardareli & Di Filippo (2004), sendo um aterro sanitário (revestido com membrana impermeável) e um aterro controlado (com disposição direta de resíduos sobre o solo), são aplicados os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida. Os resultados obtidos no aterro sanitário revelam baixos valores de resistividade e altos valores de cargabilidade para a base das valas, onde ocorre saturação por acúmulo de chorume. Os sedimentos que constituem o substrato do aterro controlado são caracterizados por elevados valores de resistividade e baixos valores de cargabilidade; contudo, o substrato permeável (zona insaturada) abaixo das valas de resíduos é caracterizado por baixos valores de resistividade e elevados valores de cargabilidade.

Por meio da aplicação conjunta dos métodos de eletrorresistividade e polarização induzida no aterro sanitário de Rio Claro, SP, Moura & Malagutti Filho (2003) caracterizam os intervalos com células de resíduos enterrados, que contrastam com os sedimentos que constituem o arcabouço geológico da área. As células de resíduos estão situadas acima do nível freático e são caracterizadas por baixos valores de resistividade e elevados valores de polarizabilidade, em relação ao padrão descrito em ensaios realizados fora do aterro, que caracterizam os sedimentos da área por elevada resistividade e baixa polarizabilidade aparente. Os autores associam o padrão obtido nas células de resíduos a presença de chorume enriquecido em íons (baixa resistividade) e a presença de metais e outros materiais eletricamente carregáveis (elevada polarizabilidade).

No aterro sanitário de Bauru (Brasil), Lago (2004) aplica os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida no estudo das relações espaciais entre a área de disposição de resíduos e o ambiente natural. Os resíduos contidos em valas apresentam baixa resistividade e elevados valores de cargabilidade, depositados em cotas no terreno acima do nível freático. Os autores definem intervalos de zona saturada e zona insaturada, e apontam áreas contaminadas dentro da zona saturada, caracterizada por baixos valores de resistividade e de cargabilidade.

Em estudo de recuperação de áreas de disposição de resíduos em três áreas na Suécia por Leroux et al. (2007), foram realizadas medidas conjuntas de resistividade e cargabilidade. Todas as áreas são constituídas por sedimentos arenosos e argilosos, onde os resíduos foram dispostos diretamente sobre o solo, acima do nível freático. Os resultados característicos para os três casos foram baixos valores de resistividade e elevados valores de cargabilidade no intervalo com resíduos.

Em estudo comparativo entre eletrodos metálicos e eletrodos de Pb/PbCl<sub>2</sub>, Dahlin et al. (2002) realizam leituras de resistividade e cargabilidade por meio da técnica de caminhamento elétrico no aterro sanitário de Dalby (Suécia). Os resíduos contidos nos intervalos das valas são caracterizados por anomalias de baixa resistividade e elevada cargabilidade, dispostos acima do nível freático.

Os artigos supracitados corroboram para a hipótese de ocorrência conjunta de baixa resistividade e alta cargabilidade em áreas de disposição de resíduos situadas acima do nível freático, associação descrita também em Vogelsang (1995) e Ward (1990). Entretanto, a presença de chorume na zona saturada aparentemente é caracterizada por anomalias de baixa resistividade e cargabilidade, segundo Lago (2004) e Gallas et al. (2003).

Este trabalho aplica a método de polarização induzida, por meio da técnica de caminhamento elétrico, para avaliar a aplicabilidade da ferramenta na determinação da área contaminada em um aterro de resíduos sólidos domiciliares do tipo vala, dispostos em zona insaturada.

## INTERAÇÃO ENTRE O SOLO E CONTAMINANTES GERADOS EM ATERROS

O chorume pode conter substâncias tóxicas e perigosas sob a forma sólida, líquida ou gasosa e pode apresentar elevadas concentrações de cloreto, ferro e zinco. Os elementos com elevada mobilidade iônica geralmente apresentam altas concentrações em compa-

ração aos elementos de baixa mobilidade iônica (Bagchi, 1987). O pH tende a aumentar com o tempo, pois formas ácidas iniciais tendem a estados neutralizados, com decréscimo da demanda química por oxigênio (DQO) e demanda biológica por oxigênio (DBO) (Tabela 1).

A composição do material livixiado depende do tipo e da idade do resíduo depositado no aterro, taxa de infiltração de água e pH. Entretanto, a quantidade de gás e material livixiado produzido pode ser afetada pela profundidade de disposição do material, condições climáticas regionais, variações do nível freático, espessura do material de recobrimento e controle de entrada e saída de líquidos da área (Farquhar, 1989). É esperado que nas partes rasas do material ocorra rápida decomposição aeróbica enquanto que no corpo de resíduos em profundidade ocorra somente à decomposição parcial sob condições anaeróbicas.

Ao cruzar a base do aterro, íons metálicos em solução podem ser removidos por troca iônica, sorção ou precipitação direta no substrato, especialmente quando argiloso. Os elementos orgânicos lixiviados que adentram no sistema aquífero anaeróbico – base do nível freático –, são lentamente biodegradados, gerando ácidos que podem reagir com os materiais que estruturam o aquífero, com conseqüentes alterações no fluxo geoquímico do nível (Bennett & Siegel, 1987). Em ambientes redutores, os elementos inorgânicos como ferro e manganês dissolvidos no chorume, podem ser incorporados à água subterrânea.

A quantidade de água subterrânea contaminada resultante da invasão de material livixiado depende da hidrogeologia da área e da capacidade de atenuação do substrato. Este processo pode ser efetivo por diluição e dispersão em água subterrânea em aquíferos de alta permeabilidade e com elevada condutividade hidráulica.

No caso de aquíferos menos permeáveis ou de baixa condutividade hidráulica, a contaminação carregada com sais inorgânicos pode provocar mineralizações no aquífero (Meju, 2000).

A ação de processos que resultam em alterações no estado físico das rochas, essencialmente intemperismo químico em áreas de clima tropical, pode resultar em camadas espessas de solo. A composição química dos solos residuais depende, dentre outros fatores, dos constituintes minerais da rocha alterada. Solos originados de rochas basálticas em clima tropical são ricos em óxidos de ferro, como hematita, goetita e argilo-minerais (ABGE, 1998).

A redução de óxidos de ferro e manganês pode conduzir quantidades significativas destes elementos às águas subterrâneas sob a forma de espécies dissolvidas, resultando em áreas de enriquecimento. As concentrações de ferro e manganês no aquífero são governadas por processos de diluição, oxidação-redução, dissolução abiótica de elementos minerais, troca iônica, precipitação e complexação com carbono orgânico dissolvido (Christensen et al., 2001).

Elevadas concentrações de ferro e manganês dissolvidos na água subterrânea, originados dos sedimentos do aquífero são demonstradas em áreas contaminadas, como o aterro Borden (Canadá) por Nicholson et al., (1983), no aterro Vejen (Dinamarca) por Lyngkilde & Christensen (1992) e Heron & Christensen (1995), e no aterro Grindsted (Dinamarca) por Bjerg et al. (1995).

**TABELA 1.** Mudanças típicas nas concentrações de chorume com a idade do resíduo (Farquhar, 1989; Birks & Eyles, 1997 (valores em mg/L).

Parâmetro	Idade do Resíduo		
	0 - 5 anos	5 - 10 anos	10 - 20 anos
STD	10000 - 25000	5000 - 10000	2000 - 5000
Ph	5 - 5	6 - 7	7 - 7,5
DOB	10000 - 25000	1000 - 4000	50 - 100
DOQ	15000 - 40000	10000 - 20000	1000 - 5000
N Amoniacal	500 - 1500	300 - 500	50 - 200
P total	100 - 300	10 - 100	
Cloreto	1000 - 3000	500 - 2000	100 - 500
Sulfato	500 - 2000	200 - 1000	50 - 200
Cálcio	2000 - 4000	500 - 2000	300 - 5000
Sódio + Potássio	2000 - 4000	500 - 1500	100 - 500
Magnésio + Ferro	500 - 1500	500 - 1000	100 - 500
Zinco + Alumínio	100 - 200	50 - 100	10-50
Alcalinidade	10000 - 15000	1000 - 6000	500 - 2000

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O aterro de Cordeirópolis está localizado no km 4.5 da rodovia Cássio Freitas Levy, município de Cordeirópolis, Estado de São Paulo, Brasil (Figura 1). O município possui aproximadamente 17.000 habitantes, com produção diária de 6 m<sup>3</sup> de resíduos sólidos domiciliares e economia baseada na produção de revestimentos cerâmicos e cultivo de cana-de-açúcar.

A área de estudos é um aterro controlado do tipo vala, para deposição apenas de resíduos sólidos domiciliares. Apresenta 48.400 m<sup>2</sup> de área disponível, com início das atividades em novembro de 2001 e vida útil prevista para 20 anos.

O sistema de operação consiste em valas com 5 m de profundidade, 4 m de largura e 80 m de comprimento, para deposição de resíduos diretamente sobre o solo e subsequente cobertura com uma camada de 1 m de solo.

A topografia da área é bastante plana, com declive médio de 0,5% sentido Sudeste e altitude entre 660 m

e 659 m. O aterro é cercado por fazendas de cultivo de cana-de-açúcar.

O substrato é constituído por solo argiloso com 10 m de espessura, sotoposto por um corpo de diabásio com 15 m de espessura. Abaixo deste ocorrem arenitos finos e siltitos pertencentes a Formação Tatuí. Ensaios de peneiramento e análise granulométrica conjunta, com minerais magnéticos, revelam a concentração de 60% de minerais metálicos no solo, essencialmente óxidos de ferro sob a forma de lâminas lateríticas milimétricas, glóbulos de goetitas e cristais parcialmente alterados de magnetita.

O nível freático está localizado a uma profundidade média de 50 m, com sentido de fluxo para sudeste, determinados por meio de sondagens elétricas verticais. Ensaios de condutividade hidráulica saturada de campo apontam valores entre 10<sup>-5</sup>cm/s a 10<sup>-3</sup>cm/s para o solo da área. Não existem poços instalados na área ou quaisquer outros sistemas de monitoramento ambiental do solo ou água subterrânea.

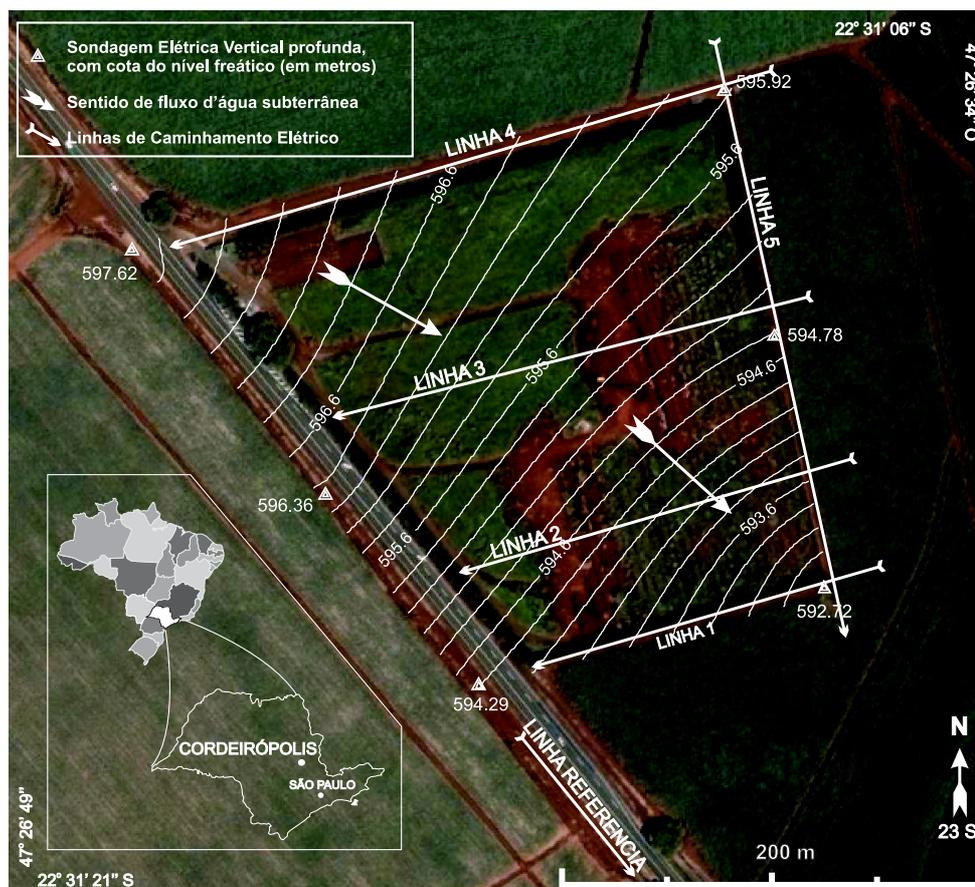


FIGURA 1. Área de estudos.

## MÉTODO

O embasamento teórico do método e a caracterização do fenômeno de polarização induzida em diversos ambientes são detalhados nos trabalhos de Sumner (1976), Telford et al. (2004), Ward (1990), dentre outros.

As leituras foram realizadas a partir da técnica de caminhamento elétrico, por meio do arranjo dipolo-dipolo com 5 m de distância entre eletrodos e 8 níveis de investigação em profundidade. Foram utilizados 50 mA de corrente de transmissão, atraso inicial de 10 ms, janela única de leituras com 100 ms de intervalo, tempo de aquisição de 2s e quatro de ciclos de leituras.

Este trabalho utilizou o resistivímetro Terrameter SAS 4000, fabricado pela ABEM (Suécia), que é calibrado para medidas de cargabilidade por meio de ciclos periódicos de corrente alternada, procedimento que permite a filtragem de ruídos durante a aquisição de dados. Foram utilizados eletrodos não-polarizáveis de Pb-PbCl<sub>2</sub> tipo Petiau (Petiau, 2000), caracterizados por elevada estabilidade ao longo do tempo.

Foram realizadas 6 linhas de aquisição de dados (Figura 1). As linhas 2 e 3 cruzam as valas de resíduos,

as linhas 1, 4 e 5 foram locadas nas laterais externa do aterro. A linha de referência foi locada ao lado da rodovia de acesso a área, na margem oposta ao aterro.

Os dados foram processados no programa RES2DINV (Loke & Barker, 1996), onde foram gerados modelos de inversão em seções distância x profundidade (Figura 2). Durante o processamento, foi realizada a calibração de profundidade em todas as seções, a partir da profundidade de escavação das valas.

Posteriormente, todas as medidas referentes à profundidade de 4m foram tabeladas, georreferenciadas e interpoladas no programa Surfer 8.0, a partir do método de vizinhança (natural neighbor) (Figura 3).

Neste método, os grupos iniciais são determinados pelos mais altos coeficientes de associação mútua, ou seja, para a admissão de novos membros é suficiente determinar quais os representantes de maior coeficiente de associação com um dos elementos de determinado grupo (Landim, 2004). Desta forma, a escolha deste método de interpolação foi baseada na fidelidade aos valores interpolados e limitação da superfície aos valores extremos de entrada.

## RESULTADOS

As seções indicam a ocorrência de valores elevados de cargabilidade nos intervalos referentes às valas de resíduos (Figura 2). As linhas 1 e 4 foram realizadas nos limites do aterro e são caracterizadas por valores de cargabilidade até 20 ms, que possivelmente representam o padrão natural para a área.

A linha 5 também foi realizada nos limites do aterro, contudo, apresenta ampla ocorrência de valores acima de 20 ms e características semelhantes às linhas obtidas sobre as valas. Diferente das demais linhas realizadas fora do aterro, esta linha cruza o gradiente topográfico da área.

Embora o gradiente topográfico mergulhe no mesmo sentido do fluxo d'água subterrânea – ambos para ESE –, o nível freático está posicionado a 45 m abaixo das valas de resíduos. Neste contexto, é plausível concluir que o fluxo de chorume se desenvolva em zona insaturada (solo abaixo das valas), e esteja condicionado ao gradiente topográfico local.

A integração das seções resultou no mapa de cargabilidade, que representa as medidas de cargabilidade efetuadas à 4 m de profundidade, no qual estão sobrepostas as idades de fechamento das valas de resíduos (Figura 3).

Uma análise preliminar do mapa permite associar a ocorrência de valores elevados de cargabilidade às valas de resíduos recentemente fechadas. Medidas

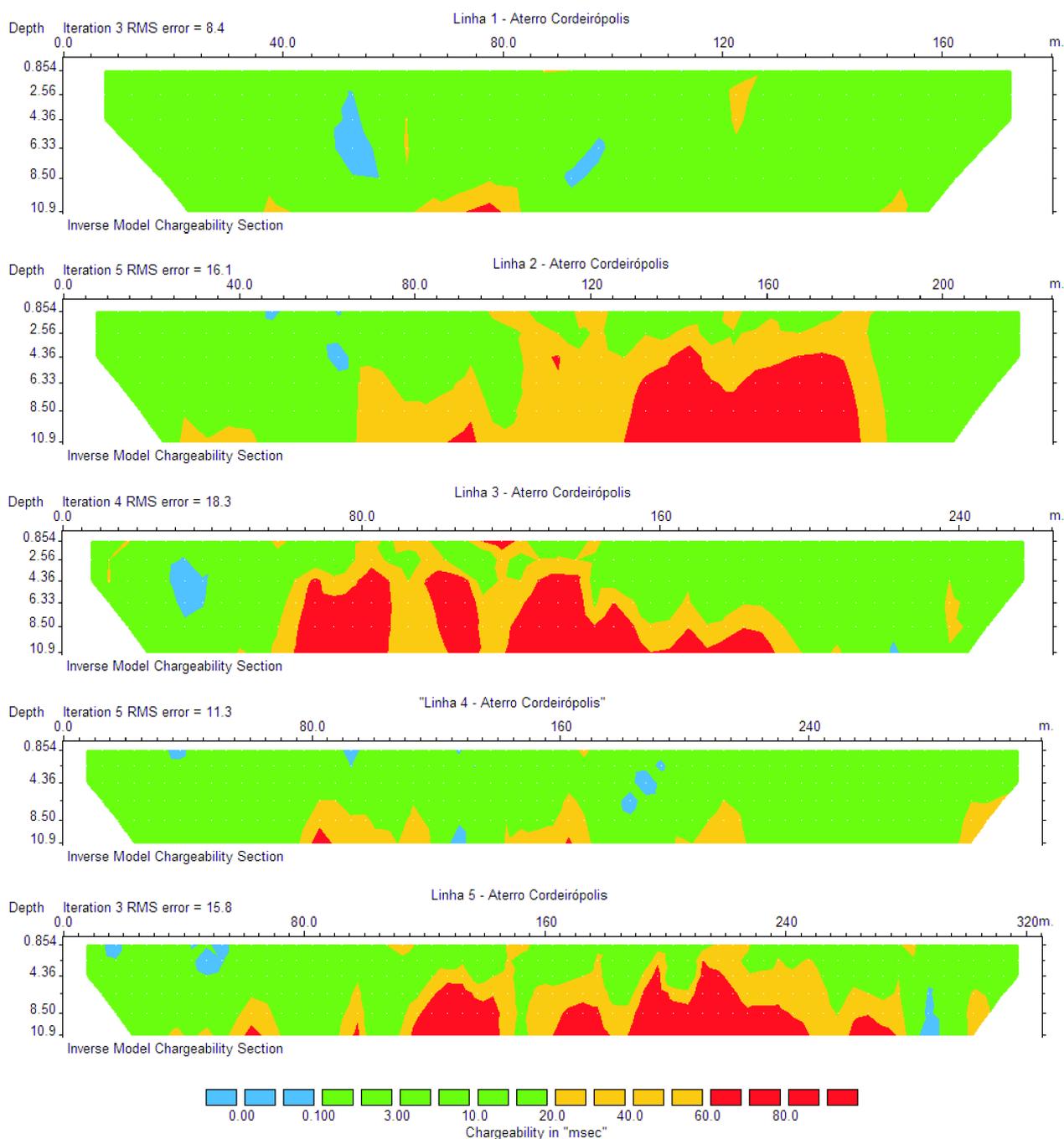
acima de 60 ms estão restritas às valas fechadas entre 2005 e 2007 e valores entre 20 e 60 ms ocorrem nas valas fechadas até 2003.

Aparentemente, há uma relação entre a disponibilidade de matéria orgânica passível ou em processo de decomposição e a ocorrência de altos valores de cargabilidade. As valas mais recentes apresentam grandes quantidades de matéria orgânica em relação às valas mais antigas.

O líquido lixiviado do processo de decomposição, denominado chorume, é caracterizado pela acidez e elevada demanda química por oxigênio (DQO) e elevada demanda biológica por oxigênio (DBO), que imprimem condições redutoras no ambiente contaminado após o consumo do oxigênio disponível. O estabelecimento de condições ácidas e redutoras num solo argiloso e rico em óxidos, resulta a solubilização de elementos metálicos, especificamente o ferro para o caso estudado, além de argilominerais em quantidades significativas.

No monitoramento de contaminantes orgânicos por meio de polarização induzida espectral (SIP), Olhoeft (1985) propõe que o estabelecimento de determinadas condições de oxidação/redução e reações de troca catiônica, os argilominerais produzem efeito de polarização induzida.

Segundo Vanhala et al. (1997), os principais fatores que influenciam o efeito IP em sedimentos são: mine-



**FIGURA 2.** Seções de cargabilidade.

ralogia, textura do material e composição do fluido intersticial – eletrólito. Sob um contexto de disponibilidade de argilominerais eletronegativos em solução enriquecida por cátions – choro, ocorre à formação de dupla camada elétrica na interface dos argilominerais. Este fenômeno é diretamente associada capacidade de troca catiônica (CTC) dos argilominerais (Vinegar & Waxman, 1984; Marshall & Madden, 1959).

A influência da textura na magnitude do efeito IP reside no fato de argilas compactadas (elevada CTC) apresentarem efeito IP fraco, sendo o efeito IP forte

em sedimentos que contenham somente argilominerais particulados (baixa CTC). Por outro dado, o aumento da salinidade ou concentração de íons, decresce o efeito IP (Marshall & Madden, 1959; Klein & Still, 1982).

É provável que as áreas do aterro com elevada cargabilidade, especialmente valores acima de 60ms, sejam áreas de concentração de metais solubilizados. A relação destas áreas com as valas recentemente fechadas, onde a concentração relativa de choro é grande e, conseqüentemente a salinidade também, o efeito IP nos argilominerais dissolvidos deve ser pequeno.

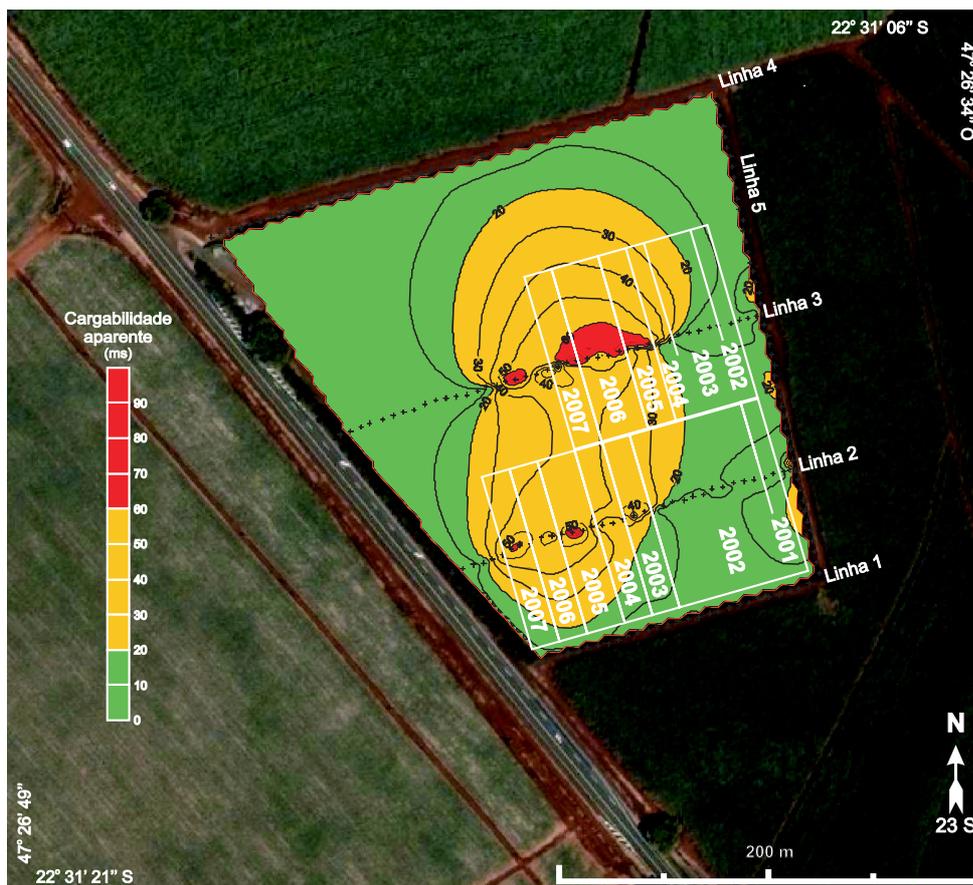


FIGURA 3. Mapa de carga elétrica aparente, com idade de fechamento das valas de resíduos.

Ao passo em que a matéria orgânica se torna escassa, o chorume perde suas características físico-químicas, elevando seu pH e tendência a condições oxidantes. O crescente estabelecimento destas condições deve resultar na precipitação dos elementos metálicos, sob a forma de óxidos hidróxidos de ferro, em semelhança as formas de ocorrência no ambiente natural (hematita e goetita). Estes óxidos apresentam baixa carga elétrica, conforme sugere as seções 1 e 4 realizadas fora da área do aterro.

A posição da linha 5 (no cruzamento do gradiente de fluxo de chorume) e sua localização (limite do aterro), podem esclarecer sua semelhança com as seções obtidas sobre as valas. A diferença de porosidade e permeabilidade entre a área com resíduos e o

solo em redor, permite que o chorume atinja os limites do aterro com relativa rapidez (em direção a linha 5). O contato entre as valas e o solo que cruza o sentido de fluxo do chorume, constitui uma interface de redução/oxidação, respectivamente.

O chorume que eventualmente chega nesta interface, apresenta carga relativamente reduzida em íons dissolvidos. O ataque ao solo e a conseqüente dissolução de argilominerais, produzem condições de geração de efeito IP relativamente elevado. A ocorrência de valores abaixo de 20 ms para as valas fechadas entre 2003 e 2001, podem indicar que a quantidade de metais e argilominerais em solução seja reduzida, a ponto de não produzirem anomalias em magnitude acima dos padrões naturais da área.

## CONCLUSÕES

O parâmetro físico resistividade elétrica é diretamente susceptível a alterações provocadas pela presença de contaminantes no ambiente geológico. A redução nos valores de resistividade em áreas contaminadas por compostos inorgânicos, como no caso de

aterros sanitários ou lixões, é resultado direto da elevada carga de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) que caracteriza o líquido proveniente da decomposição de resíduos sólidos. Esta característica permite a relação direta entre intervalos de baixa resistividade elétrica com elevados

teores de contaminação, possibilitando nestes casos a definição de áreas prioritárias para instalação de poços de monitoramento e remediação.

Por sua vez, o parâmetro físico cargabilidade indica a presença de materiais passíveis de polarização, a partir dos fenômenos de polarização eletrônica ou eletrolítica. O fenômeno de polarização eletrônica ocorre em rochas que contenham minerais condutivos disseminados como sulfetos e metais nativos, enquanto que o fenômeno de polarização eletrolítica pode estar associado à diferença de potencial gerada pelo acúmulo de íons em pontos de estrangulamento em caminhos de fluxo de íons ou por influência de argilominerais eletricamente carregados.

Características geoquímicas específicas dos ambientes contaminados por chorume resultam na solubilização de metais e dissolução de argilominerais, quando disponíveis nos resíduos ou sedimentos. A passagem

de campo elétrico neste ambiente pode estimular o fenômeno de polarização eletrônica nos metais e solução, além da estimulação do fenômeno de polarização eletrolítica para o caso dos argilominerais.

Sob este contexto, o método de polarização induzida pode representar uma ferramenta para avaliação indireta das condições geoquímicas em áreas contaminadas.

Em áreas sob condições geoquímicas ácidas e redutoras é provável que predomine o fenômeno de polarização eletrônica, de elevada magnitude e associado a zonas ricas em matéria orgânica passível de decomposição e geração de chorume.

Áreas onde a disponibilidade de matéria orgânica seja relativamente restrita devido a períodos maiores de decomposição, as características geoquímicas do chorume produzido são atenuadas devido a menor produção e dispersão no ambiente. A polarizabilidade destas áreas pode ser semelhante ao padrão natural local.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com suporte financeiro da CAPES. Os autores agradecem o técnico Francisco Manoel Garcia Barrera, Carlos Aparecido Moreira e Fabíola Coutinho Servidoni pelo auxílio durante a aquisição de dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E GEOLOGIA AMBIENTAL. **Geologia de Engenharia**, São Paulo, 587 p., 1998.
2. ABU-ZEID, N.; BIANCHINI, G.; SANTARATO, G.; VACCARO, C. Geochemical characterisation and geophysical mapping of Landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy). **Environmental Geology**, n. 45, p. 439-447, 2004.
3. BAGCHI, A. Natural attenuation mechanisms of landfill leachate and effects of various factors on the mechanism. **Waste Management Research**, n. 5, p. 453-464, 1987.
4. BENNETT, P. & SIEGEL, D.I. Increased solubility of quartz in water due to complexing by organic compounds. **Nature**, v. 326, p. 684-686, 1987.
5. BIRKS, J. & EYLES, C.A. Leachate from landfill along the Niagara Escarpment. In: EYLES, N. (Ed.), **Environmental Geology of Urban Areas**. Geological Association of Canada, p. 347-363, 1997.
6. BJERG, P.L.; RÜGGE, K.; PEDERSEN, J.K.; CHRISTENSEN, T.H. Distribution of redox sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). **Environmental Science Technology**, n. 29, p. 1387-1394, 1995.
7. CARDARELLI, E. & DI FILIPPO, G. Integrated geophysical surveys on the waste dump: evaluation physical parameters to characterized an urban waste dump (four cases study in Italy). **Waste Management & Research**, n. 22, p. 390-402, 2004.
8. CHRISTENSEN, T.H.; KJELDSSEN, P.; BJERG, P.L.; JENSEN, D.L.; CHRISTENSEN, J.B.; BAUN, A.; ALBRECHTSEN, H.J.; HERON, G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. **Applied Geochemistry**, n. 16, p. 659-718, 2001.
9. DAHLIN, T.; LEROUX, V.; NISSEN, J. Measuring techniques in induced polarization imaging, **Journal of Applied Geophysics**, v. 50, n. 3, p. 279-298, 2002.
10. FARQUHAR, G.J. Leachate: production and characterization. **Canadian Journal of Civil Engineering**, n. 16, p. 317-325, 1989.
11. GALLAS, J.D.F.; MALAGUTTI FILHO, W.; PRADO, L.R.; TAIOLI, F. Lixão de Alvarenga – Mapeamento da pluma de contaminação pelos métodos Geofísicos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 8, 2003, Rio de Janeiro. **Resumo Expandido...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2008, p. 1-4.
12. HERON, G. & CHRISTENSEN, T.H. Impact of sediment-bound iron on redox buffering in a landfill leachate polluted aquifer (Vejen, Denmark). **Environmental Science Technology**, v. 29, n. 1, p. 187-192, 1995.
13. KELLER, G.V. & FRISCHKNECHT, F.C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Pergamon Press, 562 p., 1966.
14. KLEIN, J.D. & SILL, W.R. Electrical properties of artificial clay-bearing sandstones. **Geophysics**, v. 47, p. 1593-1605, 1982.
15. LAGO, A.L. **Aplicação integrada de métodos geofísicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP**. São Paulo, 2004. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo.
16. LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Edunesp, 2º ed., 253 p., 2004.
17. LEROUX, V.; DAHLIN, T.; SVESSON, M. Dense resistivity and induced polarization profiling for a landfill restoration project at Hårlov, Southern Sweden. **Waste Management & Research**, n. 25, p. 49-60, 2007.

18. LOKE, M.H. & BARKER, R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. **Geophysical Prospecting**, n. 44, p. 131-152, 1996.
19. LYNGKILDE, J. & CHRISTENSEN, T.H. Redox zones of a landfill leachate pollution plume (Vejen, Denmark). **Journal Contaminant Hydrogeology**, n. 10, p. 273-289, 1992.
20. MARSHALL, D.J. & MADDEN, T.R. Induced polarization, a study of its causes. **Geophysics**, v. 24, p. 780-816, 1959.
21. MEJU, M.A. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. **Journal of Applied Geophysics**, v. 44, p. 115-150, 2000.
22. MOURA, H.P.; & MALAGUTTI FILHO, W. Métodos de Eletroresistividade e Polarização Induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: aterro controlado de Rio Claro, SP. **Geociências**, v. 22, p. 129-139, 2003.
23. NICHOLSON, R.V.; CHERRY, J.A.; REARDON, E.J. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study 6. Hidrogeochemistry. **Journal of Hydrogeology**, n. 63, p. 161-176, 1983.
24. OLHOEFT, G.R. Low frequency electrical properties. **Geophysics**, v. 50, p. 2492-2503, 1985.
25. PETIAU, G. Second generation of Lead-Lead Chloride Electrodes for Geophysical applications. **Pure and Applied Geophysics**, n. 157, p. 357-382, 2000.
26. SUMNER, J.S. **Principles of induced polarization for geophysical exploration**. Elsevier Scientific, Amsterdam, 277 p., 1976.
27. TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**, 2º ed. New York: Cambridge University Press, 774 p., 2004.
28. VANHALA, H. Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method. **Geophysical Prospecting**, v. 45, p. 303-326, 1997.
29. VINEGAR, H.J. & WAXMAN, M.H.H. Induced polarization of shaly sands. **Geophysics**, v. 48, p. 1267-1287, 1984.
30. VOGELANG, D. **Environmental Geophysics**. Springer-Verlag, 173 p., 1995.
31. WARD, S.H. Resistivity and induced polarization methods. Investigations in Geophysics, nº 5. **Geotechnical and Environmental Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Stanley H. Ward, v. 1, p. 147-198, 1990.

*Manuscrito Recebido em: 10 de setembro de 2008  
Revisado e Aceito em: 23 de novembro de 2008*

