



Técnica de Sondagem Elétrica Vertical utilizada no estudo de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos

Alexandre Lisboa Lago¹, Vagner Roberto Elis² (e-mail: alexandre@iag.usp.br, vagnelis@iag.usp.br)

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geofísica do IAG-USP

² Docente do Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP)

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The aim of the present work is the characterization of an waste disposal area placed in Bauru, São Paulo State, through the application of Vertical Electrical Sounding. The geophysical technique employed in this work provided a considerable amount of informations among several characters related to interaction between urban solid waste disposal area and the natural environment.

Introdução

Os problemas relacionados às áreas de disposição de resíduos são considerados, a nível global, como uma das principais fontes potenciais de contaminação do solo e da água subterrânea. A geofísica tem mostrado eficácia em mapear áreas afetadas, contribuindo para tornar mais efetivos os programas de sondagem voltados à coleta de amostras e instalação de sistemas de monitoramento. Dentro desse contexto, este trabalho teve como objetivo a aplicação da técnica de sondagem elétrica vertical em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos na cidade de Bauru/SP para buscar informações sobre a estrutura do depósito e posição da zona saturada. Além de ser um procedimento mais rápido e de custos mais baixos que o método de investigação direta, o ensaio geofísico tem a vantagem de não causar nenhuma modificação no local, como por exemplo perfurar camadas selantes.

Exemplos de aplicação de geofísica no estudo da contaminação gerada por resíduos sólidos urbanos podem ser encontrados na literatura desde o final da década de 60 e início dos anos 70. A partir da década de 80 as pesquisas mostraram grandes progressos.

Entre vários trabalhos dessa década, destaca-se Benson et al (1982), da U. S. Environmental Protection Agency, que descreveram o uso de seis métodos geofísicos, GPR (Ground Penetrating Radar), FDEM (Frequency Domain Electromagnetic), ER (Electro Resistivity), Sísmica de Refração, Magnetométrico e Detector de Metais (MD), aplicados na detecção de resíduos enterrados e na migração desses resíduos ou produtos por eles gerados.

No início da década de 90 vários trabalhos foram realizados como por exemplo os de Carpenter et al. (1990), Buselli et al. (1992), Elis & Zuquette (1997) e Elis (1999).

A geofísica aplicada em estudos ambientais, particularmente em estudos relacionados a disposição de resíduos sólidos urbanos, torna-se uma ferramenta de grande potencialidade na aquisição de informações relacionadas ao estudo dessas áreas. Destacam-se, também, os trabalhos de Meju (2000), Bratus & Yabar (2001), Morales & Mendes (2001), Moura (2002).

Metodologia

O método da eletrorresistividade é provavelmente o método geofísico mais utilizado, devido a possibilidade de aplicação nos diversos campos de estudo, como Mineração, Geologia de Engenharia, Hidrogeologia e Estudos Ambientais.

Esse método de prospecção geofísica emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados A e B), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície através da equação:

$$\rho = \frac{K \cdot \Delta V}{I}$$

onde: ρ é a resistividade elétrica (ohm.m), K é o fator geométrico que depende das posições dos eletrodos no terreno, ΔV é a diferença de potencial entre os eletrodos M e N e I a intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B. O fator K depende da geometria do arranjo de eletrodos na superfície e pode ser calculado por meio da fórmula geral:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{AM} \right) - \left(\frac{1}{AN} \right) - \left(\frac{1}{BM} \right) + \left(\frac{1}{BN} \right) \right]}$$

O parâmetro resistividade é o inverso da condutividade elétrica, e pode ser definido como a resistência dos materiais em conduzir a corrente elétrica. A resistividade depende da natureza e estado físico do material.

A resistividade elétrica (e seu inverso, a condutividade elétrica) relacionam-se aos mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais. Esses mecanismos de propagação das correntes elétricas podem ser do tipo condutividade eletrônica ou iônica.

A condutividade eletrônica é devida ao transporte de elétrons na matriz da rocha, sendo a sua resistividade governada pelo modo de agregação dos minerais e do grau de impureza (é o caso de certos minerais metálicos e dos xistos grafitosos). A condutividade iônica deve-se ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas, e é também, chamada de condutividade eletrolítica.

Em geral, a condutividade é iônica, pois apenas em casos específicos os minerais condutores ocorrem em rochas em quantidades suficientes para aumentar sua condutividade global. A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade iônica (ou eletrolítica) é afetada principalmente por quatro fatores:

- . Composição mineralógica;
- . Porosidade;
- . Teor em água;
- . Quantidade e natureza dos sais dissolvidos.

Entre esses fatores, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de água contida e a salinidade dessa água. O aumento do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos causam uma diminuição dos valores de resistividade. Essa condição é que permite a imensa possibilidade de aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos, já que a presença de água da zona saturada e o aumento da quantidade de contaminantes ricos em sais podem ser investigados pelo método. Dentro do método da eletrorresistividade existem várias técnicas de aplicação dos ensaios. Essas técnicas de ensaios de campo podem ser de três tipos principais: sondagem elétrica vertical, caminhamento elétrico e perfilagem elétrica, dentro das quais existe uma grande variedade de configurações eletródicas possíveis, o que confere ao método um elevado grau de versatilidade.

A técnica utilizada neste trabalho foi a Sondagem Elétrica Vertical (SEV). Esta técnica é aplicada quando é desejada uma informação pontual com observação da variação vertical do parâmetro físico em profundidade, obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno. Nesse trabalho utilizou-se o software IPI (programa para interpretação de sondagem elétrica vertical e polarização induzida, desenvolvido pelo Departamento de Geologia da Universidade de Moscou).

Ensaios geofísicos realizados na área de estudo

Na área de estudo foram realizadas 9 sondagens elétricas verticais de resistividade, arranjo Schlumberger, com espaçamento AB máximo de 150 metros, denominadas de SEV1 a SEV9. A localização desses ensaios geofísicos na área de estudo é apresentada na Figura 01.

Interpretação dos ensaios realizados e discussão dos resultados

As sondagens elétricas verticais podem ser divididas principalmente em dois conjuntos: um representado pelos ensaios realizados fora da área preenchida com resíduos (sondagens de 1 a 7) e outro pelas sondagens executadas sobre o aterro (sondagens 8 e 9).

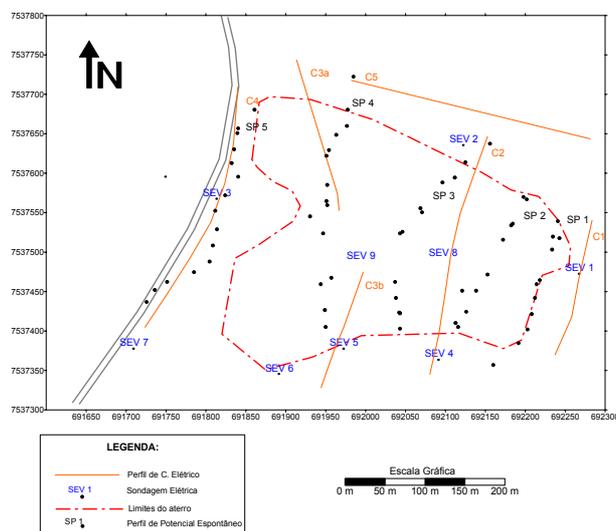


Figura 01- Mapa de localização dos ensaios geofísicos realizados na área de estudo.

As sondagens 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, forneceram dados a respeito da posição do nível d'água e do posicionamento dos diversos materiais em subsuperfície (materiais naturais e contaminados). Os resultados dessas sondagens mostraram uma grande heterogeneidade nos modelos obtidos, sobretudo em relação às camadas mais superficiais. A esses materiais convencionou-se chamar simplesmente de solo na interpretação geoeletrica. Na Tabela 01 são apresentados os resultados do modelo geoeletrico obtido para esse primeiro conjunto de sondagens.

Tabela 01 - Modelo geoeletrico das sondagens realizadas fora da cava preenchida com resíduos, proposto para o Aterro Sanitário de Bauru.

Camada	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	0.75 - 1.59	26.4 - 3136	Solo superficial
2	0.78 - 5.93	24.3 - 670	Solo não saturado
3	3.14 - 4.58	11.0 - 11.7	Solo + chorume
4	2.61 - 6.52	17.4 - 81.3	Zona de capilaridade
5	-	10.4 - 22.3	Zona saturada

Um exemplo de sondagem pertencente a esse conjunto é a SEV2, apresentada na Figura 02. A camada 1 dessa sondagem, com 3136 ohm.m, representa o solo

superficial. A camada 2, com 188 ohm.m, representa o solo não saturado. A camada 3, com 11 ohm.m, representa um solo residual arenoso, porém com valores de resistividade bastante baixos, o que sugere que existe uma percolação de chorume através desse material. A camada 4, com 24.1 ohm.m, representa uma camada de material sem contaminação com teor de umidade maior que as camadas subjacentes (zona de capilaridade). A camada 5, com 16.4 ohm.m, representa a zona saturada.

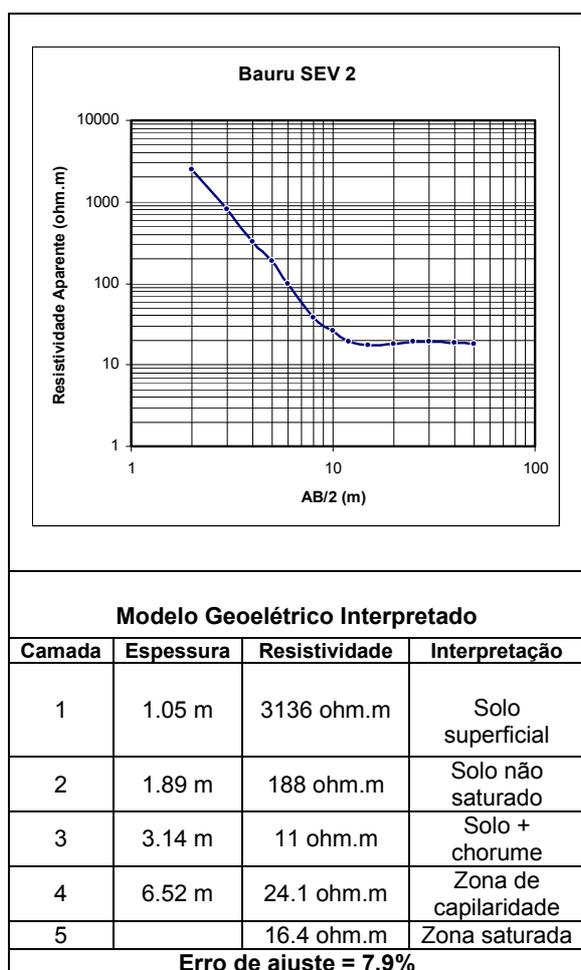


Figura 02- Interpretação da SEV 2.

As sondagens 8 e 9, realizadas dentro da cava preenchida com resíduos, possibilitaram a definição da espessura da camada de resíduos, com valores de resistividade baixos (10.2 a 18.8 ohm.m), e conseqüentemente a base do aterro, definida por valores de resistividade um pouco mais elevados (28.9 a 29.9 ohm.m). O conjunto de resultados das sondagens executadas sobre os resíduos pode ser observado na Tabela 02.

A SEV 8, apresentada na Figura 03, mostra as variações de resistividade que caracterizam o modelo para os ensaios executados sobre a área preenchida com resíduos.

Tabela 02 - Modelo geológico das sondagens realizadas dentro da cava preenchida com resíduos, proposto para o Aterro Sanitário de Bauru.

Camada	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	0.73 – 2.02	28.8 – 166	Material de cobertura do aterro
2	4.05 – 4.37	18.3 – 18.8	Resíduos
3	16.4 – 20.1	10.2 – 10.4	Resíduos + chorume
4	-	28.9 – 29.9	Base do aterro

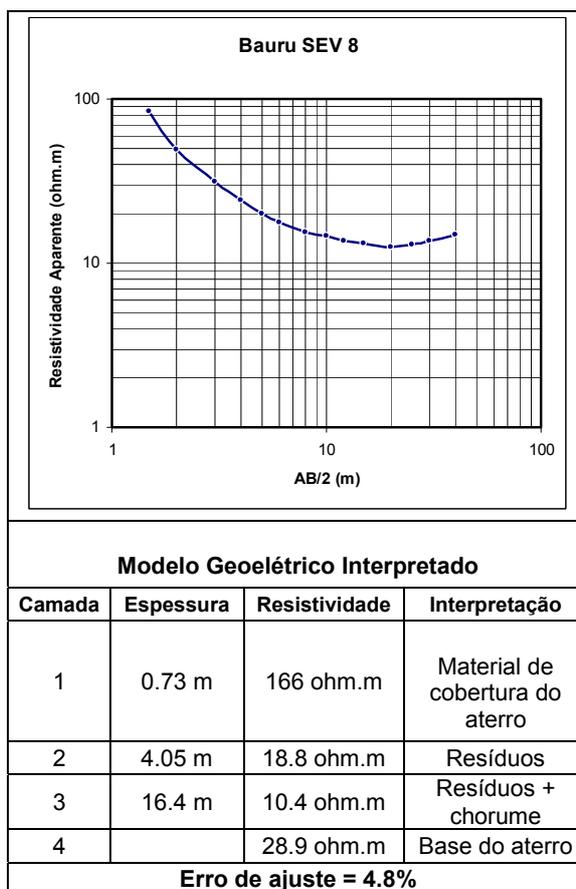


Figura 03 - Interpretação da SEV 8.

A realização dos ensaios de sondagem elétrica permitiu estudar a posição da zona saturada na área do aterro. Através dos dados obtidos para a profundidade da zona saturada foi construído, tomando-se as cotas do nível d'água em cada sondagem elétrica, o mapa de fluxo subterrâneo, apresentado na Figura 04, que mostra que o sentido principal do fluxo local é de leste para oeste-noroeste.

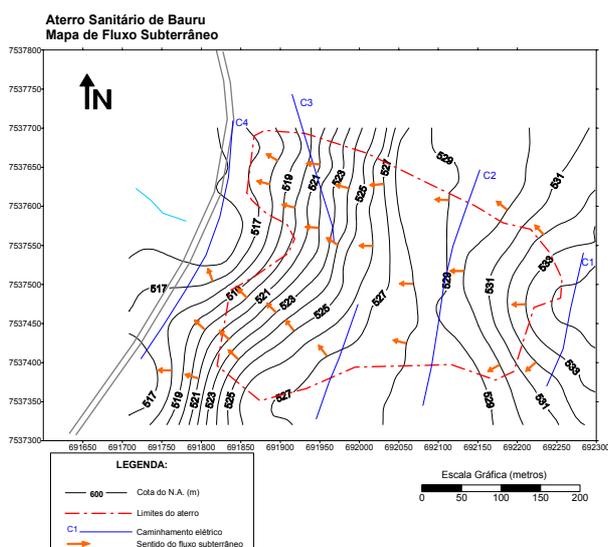


Figura 04 – Mapa de fluxo subterrâneo do Aterro Sanitário de Bauru.

Conclusões

A análise das curvas obtidas pela técnica de sondagem elétrica vertical realizadas fora da área preenchida com resíduos, possibilitou definir a posição do nível d' água e do posicionamento dos diversos materiais em subsuperfície, assim como, possibilitou observar a profundidade do nível d' água variando entre 8,03 e 12,6 metros.

Quanto aos materiais em subsuperfície foram identificados 5 horizontes geoeletricos, cujos intervalos de resistividade foram interpretados da seguinte maneira:

- 1- Intervalo de resistividade (26.4 – 3136 ohm.m) caracteriza o solo superficial;
- 2- Intervalo de resistividade (24.3 – 670 ohm.m) caracteriza o solo não saturado;
- 3- Intervalo de resistividade (11.0 – 11.7 ohm.m) caracteriza o solo com chorume;
- 4- Intervalo de resistividade (17.4 – 81.3 ohm.m) caracteriza a zona de capilaridade;
- 5- Intervalo de resistividade (10.4 – 22.3 ohm.m) caracteriza a zona saturada.

A heterogeneidade elétrica observada nas camadas mais superficiais reflete a mistura de materiais que caracterizam o solo superficial da área, representado ora por uma camada de areia fina, silto-argilosa, seguida de solo coluvionar, ora pelo próprio colúvio composto de areia argilosa.

A análise das curvas obtidas pela técnica de sondagem elétrica vertical (SEV 8 e SEV 9) realizadas sobre a cava preenchida com resíduos, permitiu a determinação da estrutura do Aterro Sanitário, constituído de: material de cobertura do aterro (28.8 – 166 ohm.m); resíduos (18.3 – 18.8 ohm.m); resíduos e chorume (10.2 – 18.8 ohm.m); base da cava (28.9 – 29.9 ohm.m).

Em síntese, a técnica de Sondagem Elétrica Vertical forneceu uma série de informações que, por sua vez, auxiliam no processo de análise da área de estudo

quanto às características do meio físico e quanto às relações entre os resíduos e o local de disposição.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado. Ao Prof. Dr. Heraldo Giacheti da Faculdade de Engenharia da Unesp-Bauru pelo apoio logístico durante as etapas de campo. Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG/USP) pelo suporte à pesquisa. Aos amigos Henrique Dal Pozzo, Elizete M. A. da Silva, Selma Isabel Rodrigues e Márcia Hatea, e ao técnico Ernande C. Santos pelo auxílio na aquisição dos dados de campo.

Referências

- BENSON, R.C.; GLACCUM, R.A. & NOEL, M.R. – 1982 – *Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration*. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 236p.
- BRATUS, A. & YABAR, D. N. – 2001 – Characterisation of three different waste disposals using resistivity and IP methods. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 7., Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 216-219.
- BUSELLI, G.; DAVIS, G.B.; BARBER, C.; HEIGHT, M.I. & HOWARD, S.H.D. – 1992 – The application of electromagnetic and electrical methods to groundwater problems in urban environment. *Exploration Geophysics* 23 (4), p. 543-556.
- CARPENTER, P.J.; KAUFMANN, R.S. & PRICE, B. – 1990 – The use of resistivity soundings to determine landfill structure. *Ground Water* 28 (4), p. 569-575.
- ELIS, V.R. – 1999 – *Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 264 p.
- ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. – 1997 – Determinação da estrutura do aterro sanitário de Ribeirão Preto através de métodos geoeletricos. *Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo (SP), Vol I*, p. 417-420.
- MEJU, M. A. – 2000 – Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*, 44: 115-150.
- MORALES, G. P.; MENDES, R. L. R. Delimitação da pluma de contaminação dos resíduos sólidos do lixão do Aura (Ananindeua – PA) por imageamento elétrico. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 7., 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p.232-235.
- MOURA, H.P. – 2002 – *Emprego da eletroresistividade e da polarização induzida na caracterização geoeletrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 231 p.