

EMPREGO DA SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL COM O MÉTODO DA ELETTRORESISTIVIDADE NO ESTUDO DO LIXÃO DE MACAPÁ-AP

Helyelson Paredes MOURA ¹, Marcelo José de OLIVEIRA ²,
Roberto de Jesus Vega SACASA ², José Maria Luz do ROSÁRIO ²,
Walter MALAGUTTI FILHO ³, Flávio Augusto França SOUTO ²,
José Reinaldo Cardoso NERY ¹

(1) Universidade Federal do Amapá. Rodovia Juscelino Kubitschek de Oliveira, km 02 – Bairro Universidade. Caixa Postal 261. CEP 68902-280. Macapá, AP. Endereços eletrônicos: helyelson@unifap.br; jrnerly@unifap.br.

(2) Instituto de Pesquisa Científica e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA). Rodovia JK, km 10 – Distrito da Fazendinha. CEP 68912-250. Macapá, AP. Endereços eletrônicos: Marcelo.oliveira@iepa.ap.gov.br; roberto.sacasa@iepa.ap.gov.br; jmlrosario@bol.com.br; flavio.Souto@iepa.ap.gov.br.

(3) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. Caixa Postal 178. CEP 13506-970. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: malaguti@rc.unesp.br.

Introdução
Localização e Aspecto Geológico da Área Estudada
Metodologia Geofísica Utilizada
Apresentação e Análise dos Resultados Geofísicos
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Ensaio de sondagens elétricas verticais - método da eletroresistividade - foram executados no lixão de Macapá - AP, tendo como objetivo investigar as características geoeletricas e hidrogeológicas do meio físico. Os resultados da interpretação geofísica permitiram obter um modelo de cinco camadas até a profundidade de 14,6 m. Esse modelo é correlacionado à uma seqüência sedimentar, composta por sedimentos predominantemente argilo-siltico-arenosos com concreções lateríticas. O sentido do fluxo subterrâneo na área, também determinado, é concordante com o gradiente topográfico.

Palavras-chave: resistividade, geofísica aplicada, lixão.

ABSTRACT – *H.P. Moura, M.J. de Oliveira, R. de J.V. Sacasa, J.M.L. do Rosário, W. Malagutti Filho, F.A.F. Souto, J.R.C. Nery - Vertical electric sounding with the method of the electroresistivity in study of the sanitary landfill in Macapá - AP. Vertical electrical soundings using electroresistivity method were carried out in the public waste landfill in Macapá - AP, having as a goal to investigate the geoelectrical and hidrogeologic characteristics of the ground. The results of geophysics interpretation allowed obtaining a model of five geoelectrical layers until the depth of 14,6 m. This model is correlated to a sedimentary sequence of clay-silt-sandy with laterite. The main flow of the water table, also determined, is concordant to the topographical gradient.*

Keywords: resistivity, applied geophysics, waste landfill.

INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais causados pela intervenção do homem nas condições existentes no meio ambiente, como a poluição dos solos e das águas subterrâneas, constituem atualmente uma das grandes preocupações mundiais. A crescente expansão urbana, industrial, agrícola e das atividades extrativas diversas, leva ao conseqüente aumento da produção de resíduos sólidos e efluentes, gerando muitos problemas relacionados à forma de disposição dos mesmos. A disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros controlados e antigos lixões/lixadeiras tem preocupado os pesquisadores das mais diferentes áreas ligadas à caracterização geoambiental, pois o chorume produzido pela decomposição dos resíduos pode atingir

as águas subterrâneas que servem como abastecimento doméstico.

Neste contexto, métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos vêm sendo utilizados com sucesso no conhecimento dos aspectos de natureza geológica, geotécnica e hidrogeológica de áreas de disposição de resíduos (Porsani et al., 2004; Moura, 2002; Vogelsang, 1995), especificamente, na determinação da profundidade do nível d'água, espessura dos aquíferos, direção e sentido do fluxo das águas subterrâneas, parâmetros esses fundamentais para o posterior monitoramento dos efeitos da disposição.

Neste trabalho apresentam-se os resultados da aplicação do método da eletroresistividade, utilizando

a técnica de sondagem elétrica vertical (SEV), na caracterização geoeétrica do lixão da cidade de Macapá-AP. Essa caracterização compreende a deter-

minação das espessuras dos materiais litológicos, da profundidade do lençol freático e na elaboração do mapa potenciométrico das águas subterrâneas.

LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA ESTUDADA

O lixão da cidade de Macapá situa-se na margem esquerda da rodovia BR-156 que interliga os municípios de Macapá e Porto Grande, na altura do km 14, possuindo uma área total de, aproximadamente, 121 hectares, como pode ser observado no mapa de localização mostrado na Figura 1.

O lixão, que existe há cerca de 10 anos, pode ser caracterizado como um típico lixão a céu aberto, onde os resíduos são depositados diretamente ao solo, sem nenhum critério técnico de disposição, impermeabilização de base, sem drenagem do chorume e gases e sem estruturas de contenção e tratamentos de resíduos. A disposição dos resíduos, desde a sua origem, é realizada principalmente em uma grande ravina, o que leva a uma maior infiltração e percolação das águas pluviais através dos resíduos e, por consequência, maior produção de chorume, agravando ainda mais os

impactos ambientais ao solo e às águas superficiais e subterrâneas.

O lixão está localizado no domínio da planície flúvio-costeira do Estado do Amapá, representada por unidades sedimentares consolidadas a parcialmente consolidadas, de idade terciária da Formação Barreiras, recobertos por sedimentos aluvionares e coluvionares recentes (Lima et al., 1991; Oliveira et al., 2004).

A Formação Barreiras, na área, é caracterizada por sedimentos predominantemente argilosos com variações de silte e areia. Intercalações de lentes e delgadas camadas areno-argilosas estão presentes nesta unidade.

Os sedimentos recentes encontram-se nas porções rebaixadas do terreno (ambiente de matas ciliares onde se originam nascentes d'água) e constituem-se de sedimentos argilo-siltico-arenosos não consolidados,

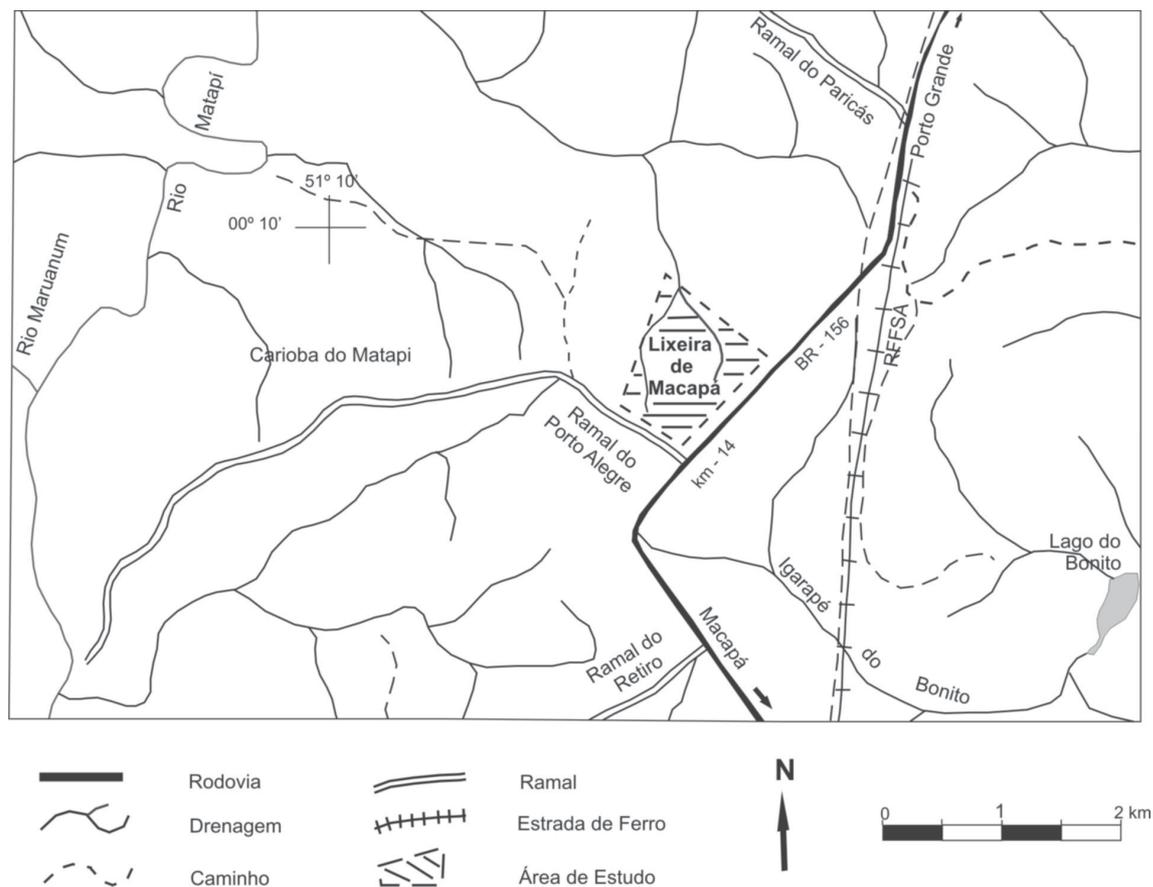


FIGURA 1. Mapa de localização do lixão da cidade de Macapá-AP.

úmidos, de coloração cinza escuro indicando a presença de matéria orgânica (Silva, 1998). O contato destes sedimentos com a Formação Barreiras é caracterizado pela presença de uma discordância erosiva (Oliveira

et al., 2004), marcada por linhas de seixos, formadas por blocos lateríticos de diferentes tamanhos.

O solo apresenta coeficiente de permeabilidade baixa da ordem de 10^{-6} cm/s (UNESP, 2005).

METODOLOGIA GEOFÍSICA UTILIZADA

No presente trabalho foi empregado o método geofísico de eletrorresistividade. Esse método baseia-se no fato de que as rochas, em função de suas composições mineralógicas, texturais, conteúdo de água e propriedades geotécnicas, apresentam variações na propriedade elétrica da resistividade. Esses comportamentos elétricos, distintos das resistividades das rochas, dos sedimentos e dos minerais, viabilizam a utilização do método como forma de investigação geológica, geotécnica, de prospecção mineral e hidrogeológica.

O método de eletrorresistividade tem como princípio a passagem pelo solo de uma corrente elétrica de intensidade I , transmitida por um par de eletrodos denominados A e B , conectados a uma fonte de corrente. Mede-se a diferença de potencial (ΔV) entre dois eletrodos de recepção denominados M e N . A partir daí, pode-se calcular a resistividade aparente ρ_a , dada pela equação:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\Omega.m) \quad (1)$$

onde K é o fator geométrico do arranjo geral do quadripolo $AMNB$ (Keller & Frischknecht, 1977) que depende somente das posições de injeção de corrente e de medida do potencial, dado por:

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

sendo AM , AN , BM e BN as distâncias entre os eletrodos.

A resistividade elétrica é o inverso da condutividade. Depende da natureza e estado físico do material, e é influenciada pelos seguintes fatores:

- resistividade dos minerais que formam a rocha;
- resistividade dos líquidos e gases que preenchem seus poros;

- umidade da rocha;
- porosidade da rocha;
- textura da rocha e a forma e distribuição de seus poros;
- processos que ocorrem no contato dos líquidos contidos nos poros e a estrutura mineral, tais como: adsorção de íons na superfície do mineral.

Na área do aterro foram executados ensaios geofísicos utilizando a técnica de sondagem elétrica vertical (SEV), com arranjo de eletrodos do tipo Schlumberger usando um espaçamento máximo dos eletrodos de corrente de 100 m.

A interpretação geofísica dos dados consistiu do uso de modelagem numérica, utilizando os métodos direto e inverso. Informações de tipos de solos, das posições do nível freático em poços de monitoramento e cacimbas, e medidas de condutividade elétrica, realizadas com condutímetro digital, em amostras de água coletadas em poços de monitoramento e cacimbas, corroboraram com a informação geofísica no mapeamento da contaminação.

Na modelagem direta dos dados de SEV, calculou-se, a partir de um método numérico que envolve filtros digitais lineares (Seara & Granda, 1987), a espessura e a resistividade das camadas, bem como a distribuição desses parâmetros em profundidade. Na modelagem direta os parâmetros dos modelos são modificados até que a curva de sondagem teórica se ajuste satisfatoriamente à curva de campo.

Na interpretação inversa calcularam-se interativamente novos modelos iniciados com os parâmetros fornecidos pelo método direto até atingir certo critério de convergência que minimizou as diferenças entre as curvas teóricas e de campo. Este processo é baseado na técnica da regressão múltipla - *Ridge Regression* (Inman, 1975).

As curvas de SEVs foram interpretadas quantitativamente pelo programa RESIX-IP (Interpex, 1993).

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS GEOFÍSICOS

Na área de estudo foram realizadas 6 sondagens elétricas verticais de resistividade e polarização induzida, denominadas de SEVIP-1 a SEVIP-6, e 3 sondagens de resistividade, denominadas SEV-6A,

SEV-8 e SEV-9. A localização dessas sondagens é apresentada na Figura 2.

As curvas de campo das sondagens elétricas verticais realizadas (Figura 3), inicialmente foram

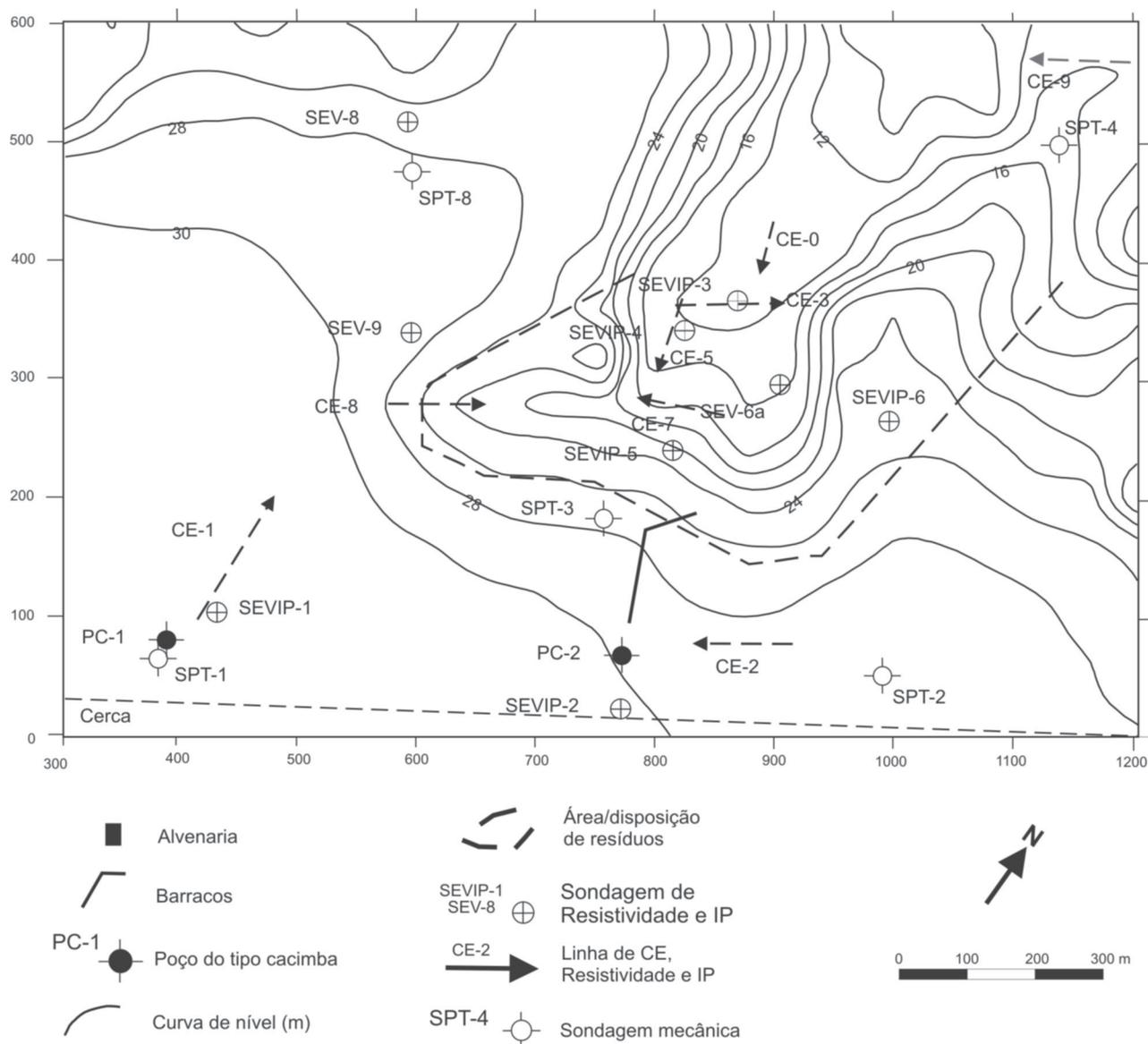


FIGURA 2. Localização dos ensaios geofísicos realizados no lixão da cidade de Macapá-AP.

divididas em dois grupos distintos: um representado pelos ensaios realizados fora da área preenchida com resíduos (SEVIP-1, SEVIP-2, SEV-8 e SEV-9) e outro pelas sondagens executadas dentro dos limites da área preenchida de resíduos (SEVIP-3, SEVIP-4, SEVIP-5, SEVIP-6 e SEV-6a), predominantemente localizadas nas porções deprimidas do terreno, conforme mostra a Figura 2.

Estes grupos apresentam características comuns, tais como, número mínimo de camada e faixa de variação da resistividade, caracterizando diferentes domínios geoeletricos, cada qual indicando um quadro geológico e/ou hidrogeológico próprio. Nota-se na Figura 3, que os valores de resistividades aparentes das curvas relativas aos ensaios realizados fora da área preenchida com resíduos estão acima da linha de resistividade aparente de $400 \Omega.m$, enquanto, as curvas

relativas aos ensaios realizados dentro dos limites da área preenchida de resíduos, os valores de resistividades aparentes estão predominantemente abaixo de $100 \Omega.m$. Isto mostra que o pacote geológico investigado, fora da área preenchida de resíduos, é mais resistivo do que o pacote investigado (resíduos e/ou material sedimentar).

Observa-se na mesma figura, que as curvas das SEVs do grupo I apresentam o ramo final descendente, interpretado como um horizonte condutivo associado a zona saturada. A variação nos valores de resistividade aparente verificada no primeiro ramo descendente de todas as curvas indica uma forte heterogeneidade lateral de resistividade. Este efeito ocasiona ambigüidade na interpretação dos dados eletroresistivos. Neste sentido, durante os ensaios de campo, tomou-se o cuidado de posicionar os eletrodos de medida do

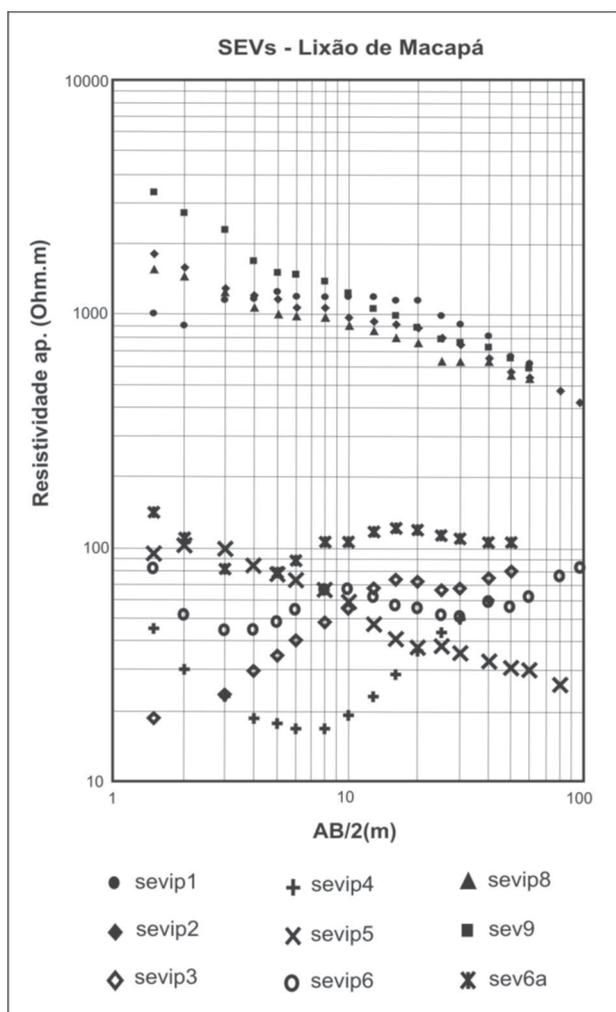


FIGURA 3. Curvas de campo das sondagens elétricas verticais.

potencial sobre o solo de textura o mais homogêneo possível.

As SEVs do grupo I possibilitaram a caracterização dos diversos materiais geológicos que compõem as zonas de repartição das águas no solo e a determinação da posição do nível d'água. Os resultados das interpretações quantitativas das SEVs é mostrado no Quadro 1.

O primeiro horizonte geoeletrico, cuja resistividade alcança valores que variam de 882 a 3529 $\Omega.m$, refere-se à cobertura superficial relacionada aos materiais predominantemente silte-areno-argilosos de coloração preta (Martins, 2005). Os maiores valores de resistividade estão relacionados aos solos desprovidos de cobertura vegetal, extremamente seco, sob intensa compactação (locais de vias de veículos), que dificulta a condução iônica, principal forma de propagação da corrente elétrica nos materiais geológicos superficiais. Os menores valores de resistividade foram medidos em locais que apresentam material predominantemente arenoso e úmido com presença de matéria orgânica.

O segundo horizonte geoeletrico apresenta valores altos de resistividades ($924 \Omega.m \leq \rho_2 \leq 1310 \Omega.m$). Esse horizonte é associado aos sedimentos predominantemente argilo-siltico-arenosos com intercalação de um nível concrecionário laterítico.

O terceiro horizonte geoeletrico, relativo à zona saturada, é associado aos materiais predominantemente argilo-siltico-arenosos, apresentando menor variação de resistividade, entre 457 e 561 $\Omega.m$, face aos materiais estarem saturados e/ou apresentarem maior quantidade de argila. Considerando a localização dos ensaios geoeletricos, do sentido do fluxo das águas subterrâneas e da posição da ravina utilizada na disposição de resíduos, interpreta-se que estes valores de resistividade refletem o valor médio regional relativo à zona saturada não sujeita a influência da percolação dos efluentes provenientes dos resíduos. Comparando as resistividades desta zona, com as medidas de

QUADRO 1. Modelo geoeletrico proposto para a área da lixeira pelas SEVs do grupo I.

Horizonte	Interpretação		Resistividade ($\Omega.m$)	Espessura (m)
1	Zona não saturada ou vadosa	Cobertura superficial / material silte-areno-argiloso	$882 \leq \rho_1 \leq 3529$	$0,8 \leq E_1 \leq 1,4$
2		Material argilo-siltico-arenoso com concreções lateríticas	$924 \leq \rho_2 \leq 1310$	$9,9 \leq E_2 \leq 12,4$
3	Zona saturada	Material argilo-siltico-arenoso	$457 \leq \rho_3 \leq 561$	-

condutividade elétrica (variação de 22,5 (444 Ω .m) a 25 (400 Ω .m) μ S/cm), medidas *in loco* nos poços tipo cacimba e tubular, localizados em cotas topográficas mais elevadas, observa-se que as águas apresentam condutividades baixas, características de ambiente natural, assim podem ser interpretadas como o *background* da área de estudo. Essas condutividades elétricas estão em conformidade com os resultados encontrados de estudos de análises físico-químicas de águas retiradas de poços do tipo amazonas e tubular, localizados em 6 comunidades (São Francisco, Vila do

Mel, Campina Grande, Rosa, Ilha Redonda e Curralinho) no entorno da lixeira. As análises mostram que a condutividade elétrica variou de 17,8 (561,8 Ω .m) a 26,5 μ S/cm (377,3 Ω .m), com exceção de um poço cujo valor foi de 97,7 μ S/cm. O parâmetro cloretos, geralmente correlacionado com a condutividade elétrica, apresentou-se muito abaixo do valor máximo permissível (250 mg/l) pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (Ferreira et al., 2005).

Os resultados das interpretações quantitativas das SEVs do grupo II são mostrados no Quadro 2.

QUADRO 2. Modelo geoeétrico proposto para a área da lixeira pelas SEVs do grupo II.

Horizonte	Interpretação		Resistividade (Ω .m)	Espessura (m)
1	Zona não saturada ou vadosa	Cobertura superficial / material silte-areno-argiloso	$20 \leq \rho_1 \leq 190$	$0,5 \leq E_1 \leq 1,7$
2		Material argilo-silte-arenoso com concreções lateríticas	58	7,9
3	Zona saturada	Material argilo-silte-arenoso	$11 \leq \rho_3 \leq 31$	$0,7 \leq E_3 \leq 8,1$
4			$96 \leq \rho_4 \leq 171$	5,1
5			$28 \leq \rho_5 \leq 89$	-

O primeiro horizonte geoeétrico, cobertura superficial, apresentou variação de resistividade elétrica baixa, devido à presença da matéria orgânica, umidade e a influência da contaminação presente em alguns locais de ensaio.

O segundo horizonte, identificado pela sondagem elétrica SEVIP (5), localizada entre duas ravinas utilizadas na disposição de resíduos (Figura 1), refere-se aos materiais geológicos da zona não saturada com provável percolação de chorume, devido a baixa resistividade encontrada (58 Ω .m) quando comparados com os valores encontrados do mesmo horizonte pelas SEVs do grupo I, interpretados como não contaminados.

A zona saturada apresentou a variação dos valores de resistividade predominantemente abaixo de 96 Ω .m (com exceção do valor de 171 Ω .m), evidenciando a

influência do lixo (através da degradação e solubilização dos seus compostos) sobre a mineralização total das águas subterrâneas, que influenciam nas resistividades obtidas pelas interpretações das SEVs. Comparando as resistividades desta zona, com a medida de condutividade elétrica de 314,6 μ S/cm (32 Ω .m) de uma amostra de água coletada em uma nascente, localizada aproximadamente 30 m da pilha de resíduos, observa-se a influência de contaminantes na zona saturada.

A seguir, com base na cota de cada sondagem elétrica vertical e nas profundidades dos níveis d'água, conhecidas pelas SEVs e poços de monitoramento, determinou-se a cota do lençol freático no ponto. Posteriormente, traçando-se as linhas equipotencias, obteve-se o mapa potenciométrico (Figura 4). O sentido do fluxo local, observando a figura, é no sentido das ravinas, isto é, seguindo o gradiente topográfico.

CONCLUSÕES

Em conformidade com os objetivos propostos para o trabalho, pode-se considerar que os resultados geofísicos evidenciam a potencialidade de aplicação da técnica de sondagem elétrica vertical na obtenção

de informações do meio físico, como as espessuras dos materiais litológicos e da posição da profundidade do lençol freático.

A análise das curvas obtidas pela técnica possi-

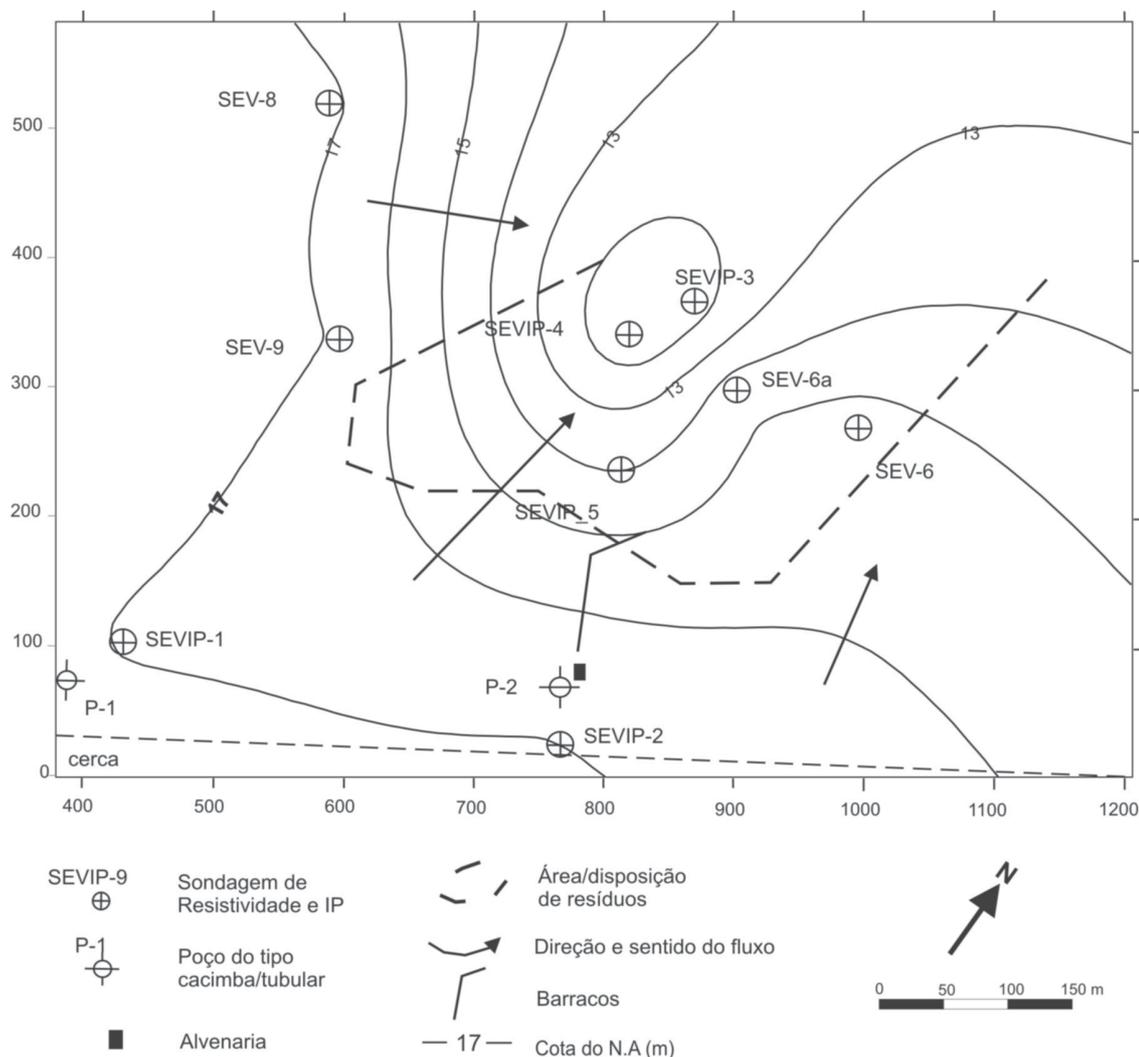


FIGURA 4. Mapa potenciométrico na área de estudo.

bilitou a definição do posicionamento das zonas de repartição das águas no subsolo, tendo a profundidade do nível d'água variando entre 0,5 e 15,2 m.

Quanto aos materiais em subsuperfície foram identificados 5 horizontes geoeletricos que compõem, em função das zonas de repartição das águas no solo, as zonas vadosa e de saturação. Os horizontes geoeletricos relacionados à zona vadosa apresentaram altas resistividades (acima de 882 Ω .m), devido à presença mínima de água no solo. A zona saturada apresentou a montante da área de resíduos, valores de

resistividade entre 457 Ω .m a 522 Ω .m. A jusante dos limites da área de disposição de resíduos, a zona saturada apresentou valores de resistividades entre 11 Ω .m a 13 Ω .m, interpretada como estando sujeita a influência de contaminantes, conforme medida de condutividade elétrica de 314,6 μ S/cm (32 Ω .m) de uma amostra de água coletada em uma nascente, localizada aproximadamente 30 m da pilha de resíduos. Na área estudada, o sentido do fluxo das águas subterrâneas é no sentido das ravinas, concordante com o gradiente topográfico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado do Amapá (SETEC) pelo apoio financeiro para a aquisição do equipamento utilizado neste trabalho. A Universidade Federal do Amapá e o Instituto de Pesquisa Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA) pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FERREIRA, A.L.C.; ANDRADE, A.P.G.; SOUZA, J.A. **Análise da Qualidade das Águas Superficiais e Subterrâneas na Região de Influência da Lixeira Pública de Macapá**. Relatório Técnico Preliminar. Macapá: SEMA, 7 p., 2005.
2. INMAN, J.R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**, Tulsa, OK, n. 40, p. 789-817, 1975.
3. INTERPEX LIMITED. **RESIX-IP v.2.0 – Resistivity and induced polarization data interpretation software: User’s manual**. Golden, Colorado, USA, 1993. Paginação irregular.
4. KELLER, G.V. & FRISCHKNECHT, F.C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Oxford: Pergamon Press, 517 p., 1977.
5. LIMA, M.I.C.; BEZERRA, P.E.L.; ARAÚJO, H.J.T. Sistematização da Geologia do Estado do Amapá. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3, 1991, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1991, p. 322-335.
6. MARTINS, A.S.F. **Prospecção geotécnica na área da lixeira pública de Macapá**. Relatório Técnico. Macapá: Fort Lages, 2005.
7. MOURA, H.P. **Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geolétrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos**. Rio Claro, 2002. 231 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
8. OLIVEIRA, M.J.; SOUTO, F.A.F.; ROSÁRIO, J.M.L. DO; SACASA, R.J.V.; MOURA, H.P. Vulnerabilidade natural e sazonalidade do aquífero livre no loteamento Marabaixo-III, Macapá-AP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: ABAS, 2004, p. 277, 2004.
9. PORSANI, J.L.; MALAGUTTI FILHO, W.; ELIS, V.R.; SHIMELES, F.; DOURADO, J.C.; MOURA, H.P. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, v. 55, n. 3-4, p. 199-209, 2004.
10. SEARA, J.L. & GRANDA, A. Interpretation of IP time domain/resistivity soundings for delineating sea – water intrusions in some coastal areas of the northeast of Spain. **Geoexploration**, n. 24, p. 153-167, 1987.
11. SILVA, A.Q.; SANTOS, V.F.; FERREIRA, N. **Relatório Técnico da Nova Lixeira do Município de Macapá-AP**. Macapá: Instituto de Pesquisa Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá/IEPA, 17 p., 1998.
12. UNESP- UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - Laboratório de Mecânica dos Solos. **Relatório de Ensaios de Laboratório de Mecânica dos Solos**. Projeto de remediação/recuperação do atual lixão e implantação do aterro controlado do Município de Macapá/AP. Baurú: UNESP, 30 p., 2005.
13. VOGELSANG, D. **Environmental Geophysics. A practical guide**. Berlin: Springer-Verlag, 174 p., 1995.

*Manuscrito Recebido em: 22 de julho de 2006
Revisado e Aceito em: 9 de abril de 2007*