

EMPREGO DE ELETORRESISTIVIDADE PARA DELIMITAÇÃO DE PLUMA DE CONTAMINAÇÃO POR LÍQUIDOS LIXIVIADOS NO ATERRO SANITÁRIO DE BELO HORIZONTE

THE USE OF RESISTIVITY SURVEYS TO DELIMIT THE LEACHATE CONTAMINATION PLUME OF THE BELO HORIZONTE LANDFILL

Luis de Almeida Prado Bacellar¹ e Cícero Antônio Antunes Catapreta²

RESUMO Estudos hidrogeológicos prévios demonstram que a água subterrânea na área do aterro sanitário de Belo Horizonte (CTRS-BR040) está contaminada por líquidos lixiviados, porém a geometria da pluma de contaminação ainda não está bem estabelecida. Neste trabalho, são apresentados os resultados da aplicação de métodos geofísicos de eletrorresistividade para caracterizar e delimitar a pluma de contaminação no vale do córrego dos Coqueiros, a jusante do talude principal do aterro, onde a contaminação possui aparentemente maior concentração. Foram executadas seis seções de eletrorresistividade com o arranjo dipolo-dipolo e em cinco profundidades de investigação. A aplicação do método mostrou-se eficiente para a delimitação da pluma, que é influenciada pelas formas de relevo do vale do córrego dos Coqueiros e pelas heterogeneidades e anisotropias do substrato geológico. Além disto, os resultados também sugerem que a pluma, com maior salinidade e, conseqüentemente, maior densidade, tende a se deslocar para a base do aquífero. Os dados do levantamento geoeletrico direcionaram as etapas seguintes de investigação subsuperficial na área, para as quais se recomendou a perfuração de poços de monitoramento multiníveis e a execução de novas campanhas de geofísica.

Palavras chave: Líquidos lixiviados; Aterro sanitário; Contaminação de água; eletrorresistividade.

ABSTRACT Previous hydrogeological studies show that groundwater in the Belo Horizonte sanitary landfill (CTRS-BR040) is contaminated by leachates, but the geometry of the contaminant plume is not well established. In this paper, it is presented the results of the application of geophysics to better define and characterize this contamination plume in the Coqueiros creek valley, downstream from the main slope of the landfill, where contamination is apparently more significant. There were executed six resistivity sections with the dipole-dipole array and with five depth of investigations. The results confirmed that the method was efficient for the delimitation of the plume, which has geometry influenced by the Coqueiros creek valley landform and by heterogeneities and anisotropies of the geological substrate. The results suggest that the plume with higher salinity and, consequently, greater density, tends to move to the bottom of the aquifer. The geoelectrical survey data led to the modification of the next investigation steps. It was recommended the drilling of multilevel monitoring wells and the implementation of new geophysical campaigns.

Keywords: Leachates; Sanitary landfills; Groundwater contamination; eletroresistivity

INTRODUÇÃO

A contaminação da água subterrânea por líquidos lixiviados de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários tem sido identificada recorrentemente no Brasil e no mundo (e.g. ELIS, 1998; VAN BREUKELEN, 2003). Na área do aterro sanitário de Belo Horizonte, foram identificadas concentrações de alguns elementos químicos no solo e na água subterrânea superiores às recomendadas pelas normas em vigor (BRASIL, 2004; MINAS GERAIS, 2010), com destaque para alguns metais pesados e, para o caso da água, de amônia não ionizável e de compostos de nitrogênio (SOUSA, 1998; SLU, 2005). Estudos desenvolvidos recentemente pela SLU - Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte (SLU, 2009) assinalaram uma nova área contaminada no fundo do vale do córrego dos Coqueiros, no setor noroeste do aterro, com a contaminação aparentemente ainda circunscrita na área do aterro sanitário. No entanto, sua extensão e geometria não estavam bem definidas. Para

caracterizá-la, optou-se pela execução de ensaios geofísicos pelo método da eletrorresistividade neste trecho, com o objetivo principal de delimitar detalhadamente a geometria e a extensão da pluma de contaminação. A eletrorresistividade apresenta a vantagem de ser um método não invasivo, de baixo custo e com bom potencial para delimitação deste tipo de plumas (MEJU, 2000; FACHIN, 2007).

Área de Estudo

Os estudos se desenvolveram na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR040 (CTRS BR-040), onde se localiza o aterro sanitário, a qual é operada pela Superintendência de Limpeza Urbana SLU, Estado de Minas Gerais. A CTRS BR-040 está situada na porção noroeste do município de Belo Horizonte, na margem direita da rodovia BR-040, sentido Brasília (Figura 1).

A CTRS BR-040 foi implantada em fevereiro de 1975, em local sem ocupação urbana significativa. Gradativamente, a região foi sendo ocupada, com o desenvolvimento de bairros de baixa e média renda. Em 1994, foi elaborado um

¹ Universidade Federal de Ouro Preto (luisapbacellar@gmail.com)

² Superintendência de Limpeza Urbana/ Prefeitura de Belo Horizonte (cicerocatapreta@yahoo.com.br)

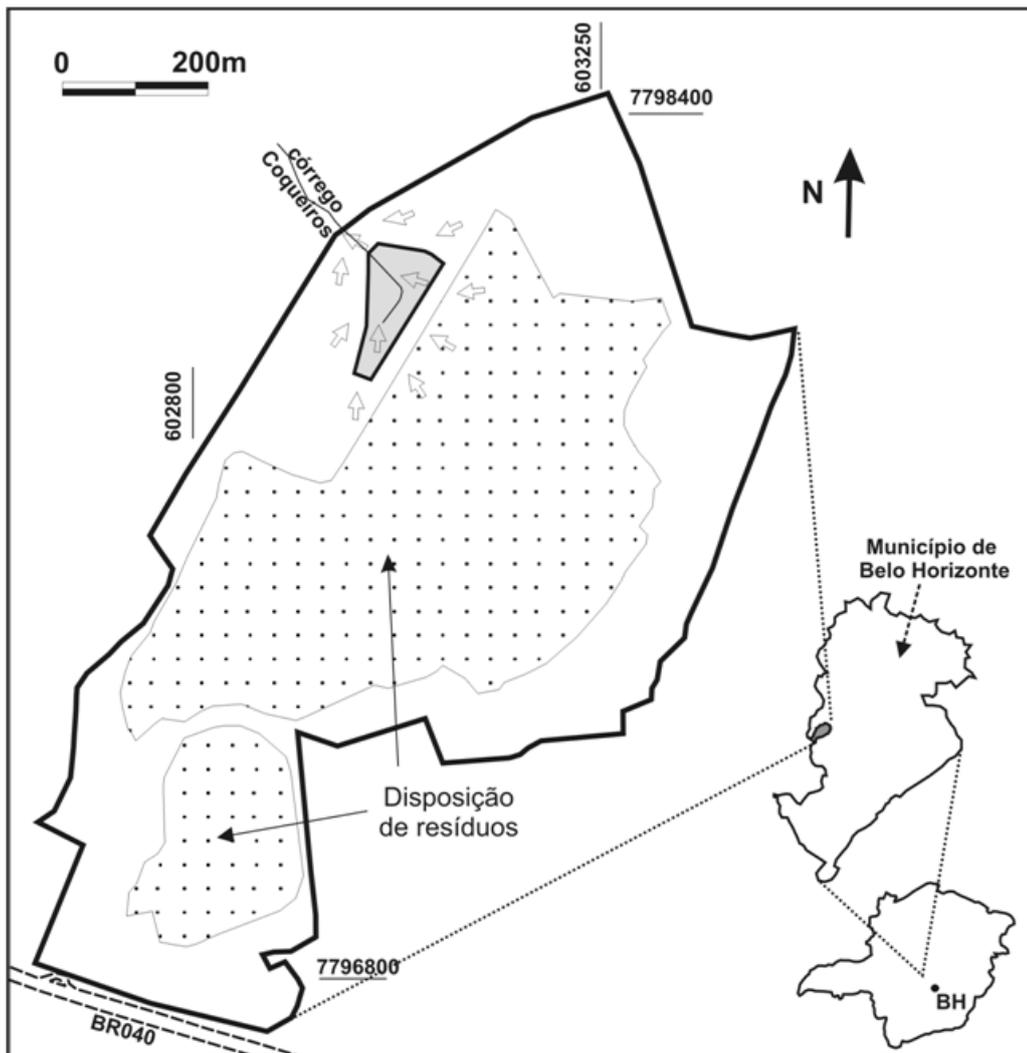


Figura 1: Mapa de localização da CTRS BR-040. A área de trabalho no interior do aterro está marcada em cinza. As setas no entorno da área de trabalho indicam o suposto sentido de movimento das águas subterrâneas.

Figure 1: Location map of the CTRS-BR-040. Gray tone polygon represents the study area in the landfill. The arrows show the presumed movement direction of groundwater.

projeto para reestruturação do aterro, visando melhorar as condições operacionais e estender sua vida útil, então prevista para perdurar até 1998 (BATISTA et al., 2004). Em 1998 este projeto foi modificado, com mudança substancial do *layout*, com proposição de novas áreas para disposição de resíduos. No aterro foram dispostos principalmente resíduos de coleta domiciliar e entulho de construção civil (BATISTA et al., 2004). A parte do aterro imediatamente a montante do córrego dos Coqueiros foi impermeabilizada na base por camada de argila de 4 m de espessura média e com condutividade hidráulica estimada em $2,0 \cdot 10^{-8}$ m/s (SLU, 2005). A parte mais distal do aterro, construída em rampa, não teve a base impermeabilizada (SLU, 2009). O encerramento das operações de aterragem de resíduos e o descomissionamento do aterro sanitário ocorreram em 2007, constando, entre outras atividades, da impermeabilização final das células mais novas com

cerca de 0,6 m de solo com permeabilidade de 10^{-8} m/s, acrescida de 0,1 m de solo orgânico e cobertura vegetal (SLU, 2009). Cabe destacar, que desde 1998 o aterro operou conforme projetos licenciados pelo órgão de gestão ambiental estadual (FEAM).

A área da CTRS BR-040 se situa no Complexo Belo Horizonte, unidade geológica com predomínio de gnaisses e migmatitos, localmente milonitizados, e de idade arqueana. Secundariamente, ocorrem diques básicos e clásticos, de idade proterozóica, além de sedimentos quaternários (SILVA et al., 1995; CPRM, 2001). Os gnaisses e migmatitos são cinza, com granulação fina a grossa ou muito grossa, com composição granítica a monzonítica e tonalítica e com bandamento conferido por alternância de bandas milimétricas a centimétricas quartzo-feldspáticas e biotíticas/anfibolíticas (SILVA et al., 1995). Os solos são normalmente delgados e apresentam quartzo e caulinita como minerais dominantes, seguidos por magnetita,

ilmenita, hematita e goethita. São argilosos, argilo-arenosos e franco-argilo-arenosos, de baixa atividade e ácidos. Nos fundos de vale de drenagem, como no do córrego dos Coqueiros, abundam solos hidromórficos ricos em argila e matéria orgânica (SOUSA, 1998). Há dois padrões de fraturas subverticais na região, uma com fraturas mais fechadas, orientadas para NW, e outra de direção média NE, mais abertas (CPRM, 2001).

A área do aterro se situa na Depressão Belo Horizonte (SILVA et al., 1995), com relevo de mares de morros. As principais drenagens na área da CTRS BR-040 são os córregos dos Coqueiros e das Taiobas, afluentes do córrego Ressaca, importante tributário da Bacia da Lagoa da Pampulha.

Segundo Silva et al. (1995), o sistema aquífero do Complexo Belo Horizonte apresenta até 100 m de espessura e compreende dois aquíferos interconectados: um livre a semiconfinado na rocha, com porosidade de fraturas, sobreposto por um aquífero livre e com porosidade intergranular no regolito (constituído por elúvios, alúvios e colúvios). Os dois padrões de fraturas condicionam o fluxo no aquífero fraturado, sobretudo o de direção NE, mais aberto e mais condutivo (CPRM, 2001).

Entre 1998 e 2007, a precipitação média anual na área do aterro variou de 1036 mm a 1657 mm, com média de 1399 mm, enquanto que a evapotranspiração real foi estimada em 1060 mm (SLU, 2009). A recarga local foi avaliada em 299 mm/ano (SLU, 2005), valor compatível com o de outras áreas do embasamento da região (MOURÃO, 2007).

Um monitoramento sistemático de qualidade da água subterrânea coletada em diversos poços de monitoramento tem sido desenvolvido na área (SLU, 2005; SLU, 2009). As coletas e as análises químicas e físico-químicas têm sido feitas conforme os métodos prescritos pela APHA/AWWA/WEF (2004) e os resultados vêm confirmando a existência de uma pluma de contaminação no fundo do vale do córrego dos Coqueiros, aparentemente ainda circunscrita ao trecho situado imediatamente a jusante do sopé do talude principal de resíduos. Segundo estudos desenvolvidos na área (COPASA, 2002; SLU, 2009), a contaminação é reconhecida por valores anormalmente altos (com relação ao *background* local) de alguns parâmetros físico-químicos, que mostram elevada correlação entre si, como sólidos totais dissolvidos (STD), condutividade elétrica, bário, sódio e cloreto (SLU, 2009). Por exemplo, o *background* geoquímico com relação ao teor de STD na região da CTRS BR-040 se situa entre 200 e 300 mg/L, mas valores muito superiores foram detectados em alguns poços de monitoramento situados imediatamente

a jusante do sopé do talude de resíduos, como no PSB3, PSB4 e PM7 (Figura 2), e atribuídos à contaminação por lixiviado (SLU, 2009).

Segundo as modelagens matemáticas executadas na área do aterro (SLU, 2005; SLU, 2009), as águas subterrâneas identificadas neste trecho com alterações de qualidade tendem a fluir em direção ao fundo do vale do córrego dos Coqueiros (Figura 1). Como salientado nestes estudos, tais modelagens pressupõem condições de homogeneidade e isotropia dos aquíferos, que nem sempre correspondem a situação real. Por tal motivo, no estudo desenvolvido pela SLU (2009), recomendou-se a execução de ensaios de eletrorresistividade para melhor conhecimento das condições subsuperficiais dos aquíferos e da pluma de contaminação.

Materiais e Métodos

Eletrorresistividade

A eletrorresistividade baseia-se na determinação indireta da resistividade elétrica de rochas e solos, empregando-se a lei de Ohm, que estabelece que a corrente (I) através de um condutor e a respectiva diferença de potencial (V) estão relacionados por uma constante de proporcionalidade denominada resistência (R), com unidade em Ohms (TELFORD et al., 1976). Como a resistência depende do comprimento (L) e da área (S) do condutor, definiu-se, então, a resistividade elétrica (ρ), independente destes fatores geométricos e fornecida pela equação 1.

$$\rho = \frac{V \cdot S}{I \cdot L} \quad (\text{Eq 1})$$

com ρ em Ohm.m.

O método da eletrorresistividade baseia-se na injeção de uma corrente elétrica no solo por meio de dois eletrodos de corrente (A e B) e na medida da diferença de potencial (ΔV) entre dois outros eletrodos (M e N). Como as condições de subsuperfície não são homogêneas e isotrópicas, o valor medido em campo permite calcular a resistividade aparente (ρ_a), fornecida pela equação 2 (ORELLANA, 1972; TELFORD et al., 1976):

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K (\Omega \cdot m) \quad (\text{Eq.2})$$

onde K é o fator geométrico, relacionado ao

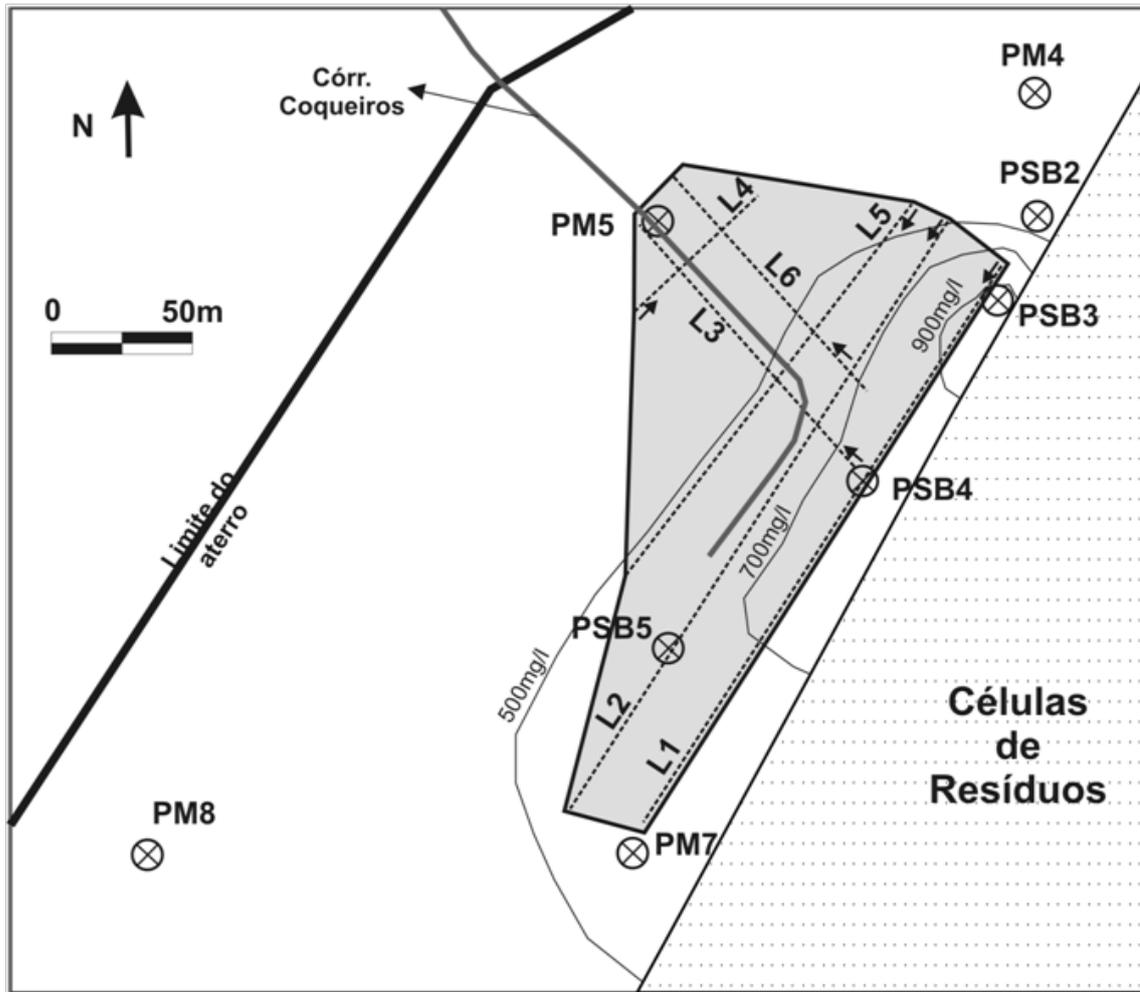


Figura 2: Mapa detalhado da área de trabalho, com o posicionamento das seções de resistividade (L1, L2, L3, L4, L5 e L6) e de oito poços de monitoramento (PM4, PM5, PM7, PM8, PSB2, PSB3, PSB4 e PSB5). Também estão representadas as isolinhas de concentração em STD nas águas subterrâneas.

Figure 2: Detailed map of the study area, with the location of the resistivity sections (L1, L2, L3, L4, L5 and L6) and of the monitoring wells (PM4, PM5, PM7, PM8, PSB2, PSB3, and PSB4 PSB5). Isolines of TDS concentration in groundwater are also showed.

arranjo de eletrodos adotado. Seu valor é dado por:

$$K = 2 \pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{Eq. 3})$$

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

Por ser muito sensível a variações laterais de resistividade elétrica, o arranjo dipolo-dipolo tem sido bastante utilizado para caracterizar aquíferos em áreas com embasamento cristalino (SEATON e BURBEY, 2002) e em estudos sobre a contaminação de água subterrânea (MEJU, 2000), mesmo possuindo uma profundidade de investigação considerada baixa. Este arranjo é composto por dois dipolos, um de corrente (AB) e um de potencial (MN). Cada dipolo possui um comprimento “a” e seus centros são separados

por uma distância “na” (Figura 3), onde “n” é um número inteiro e corresponde a quantidade de níveis de investigação. Cabe ressaltar, que valores elevados de “n” devem ser evitados a fim de garantir uma boa relação sinal/ruído (MEJU, 2000). O ponto imageado em subsuperfície é obtido pela interseção de duas linhas que partem dos centros de cada dipolo com ângulos de 45°. Medidas realizadas com diversos valores de “na” e em diferentes pontos da superfície permitem compor uma pseudo-seção de resistividade, que não reflete a profundidade real de investigação. Para estabelecer a profundidade efetiva, as pseudo-seções podem ser invertidas, como, por exemplo, com o programa computacional RES2DINV (GEOTOMO, 2010).

Aplicação da Eletrorresistividade em Aterros Sanitários

A eletrorresistividade tem sido muito empregada para compreender a configuração e a

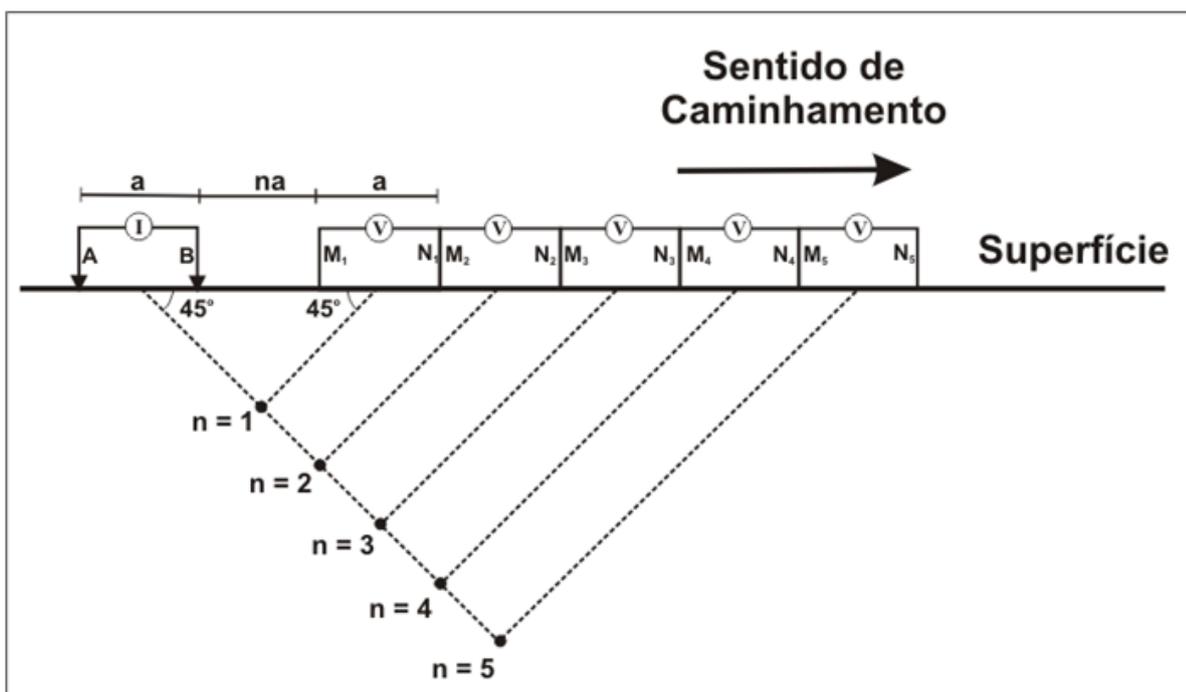


Figura 3: Disposição inicial no campo do arranjo dipolo-dipolo, com os cinco níveis de investigação teóricos (n=1 a n=5).

Figure 3: Initial layout of the dipole-dipole array, with five levels of theoretical depths (n = 1 to n = 5)

velocidade de avanço plumas de contaminação em aterros sanitários (ELIS, 1998; MEJU, 2000; MALAGUTTI FILHO et al. 2000; ELIS e ZUQUETTE, 2002; MEJU, 2006, FACHIN, 2007; ELIS et al., 2008), uma vez que os líquidos lixiviados são facilmente identificáveis por apresentar baixos valores de resistividade elétrica devido ao elevado teor de sais dissolvidos.

Pseudo-seções de resistividade aparente com o arranjo dipolo-dipolo foram levantadas em caráter experimental na própria área do aterro da CTRS BR-040, em projeto desenvolvido pela CPRM (2001). Nesta ocasião, identificaram-se duas zonas com resistividades muito contrastantes: uma com resistividades superiores a 70 Ohm.m, interpretadas como coincidentes com solos da zona não saturada ou com porções do aquífero não contaminadas por lixiviado; outra, com resistividades inferiores a 70 Ohm.m, possivelmente relacionadas com trechos contaminados por lixiviado. Neste mesmo trabalho foram feitos levantamentos em outro aterro sanitário da região (Aterro Perobas, em Contagem - MG), quando foi detectada uma zona muito mais condutiva, com resistividades de até 6 Ohm.m, interpretada como provavelmente associada à contaminação por lixiviado.

Por outro lado, a baixa resistividade do lixiviado tende a reduzir a profundidade de investigação, obrigando a adoção de arranjos de eletrodos com aberturas maiores (ELIS et al., 2008), o que dificulta a aquisição de dados em aterros sanitários, nos quais o

espaço disponível é geralmente exíguo e com restrições para o prolongamento das linhas.

Além de problemas relacionados à aquisição de dados, devem ser observados aspectos importantes em sua interpretação. Em geral, para solos saturados contaminados por lixiviados de aterros sanitários, espera-se encontrar valores de resistividade variando 1 e 30 Ohm.m (MEJU, 2000; FACHIN, 2007), mesmo considerando mudanças na sua composição devido a idade do depósito (KJELDSEN et al., 2002). Adicionalmente, a estação do ano em que o levantamento de campo foi conduzido pode aumentar a quantidade de lixiviados, particularmente em períodos chuvosos (ELIS e ZUQUETTE, 2002).

Para aquíferos arenosos, Meju (2000) apresenta a seguinte relação entre a condutividade elétrica da formação (σ_b) e o teor de sólidos totais dissolvidos (STD) da água intersticial:

$$\sigma_b = 0,477 \times STD^{0,7093} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde σ_b em mS/m e STD em mg/L.

Portanto, de posse do valor de condutividade elétrica da água pode-se, em tese, quantificar a resistividade elétrica da formação ($\rho = 1/\sigma_b$). A título de comparação, foi elaborada a tabela 1 com base na equação 4, onde estão listados alguns valores de STD da água e as respectivas resistividades.

Ou seja, numa região com meio subsuperficial homogêneo, é teoricamente possível determinar as isolinhas de concentração de STD

através da eletrorresistividade, o que possibilitaria a delimitação de plumas contaminantes e até mesmo o acompanhamento de suas taxas de movimentação. Cabe lembrar que esta equação foi obtida para um aquífero arenoso homogêneo e seu emprego é questionável em áreas com materiais mais condutivos, como em aterros sanitários, onde pode ocorrer contaminação por lixiviado e até a presença de objetos metálicos enterrados. Desta forma, Meju (2000) adverte que para cada local seja estabelecida uma relação específica, como a da equação 4, para não incorrer em erros.

Levantamento Geométrico na Área

Na área do Aterro Sanitário, foram obtidas seis seções de resistividade aparente com o arranjo dipolo-dipolo (L1 a L6), totalizando 940 m de levantamento (Figura 2). O ideal seria cobrir uma área mais ampla, mas a presença de cercas, muros, edificações e até mesmo as condições operacionais de segurança - obrigaram a limitar a aquisição.

Como o nível d'água na área investigada é raso, normalmente com menos de 6 m de profundidade (Tabela 2), e tomando-se por base os resultados de levantamentos geométricos prévios na área (CPRM, 2001), optou-se pela utilização de dipolos com comprimento de 10 metros e com cinco níveis de investigação (10m, 15m, 20m, 25m e 30m).

O aparelho empregado no levantamento é da marca Tectrol, modelo TDC 1000-2R2A, de corrente direta, com milivoltímetro com capacidade de leitura de até 3000 mV. Os eletrodos de potencial não polarizáveis, recomendados para equipamentos de corrente direta (ORELLANA, 1972; TELFORD et al., 1976; ROBINSON e ÇORUH, 1988), foram confeccionados com PVC de 1 polegada, com uma base de madeira porosa, fixada no solo. Um cabo de cobre de 3 mm de espessura sai do interior do PVC, que

é preenchido com solução saturada de sulfato de cobre, e é então conectado ao milivoltímetro.

Antes de serem carregados em planilhas eletrônicas Excel, os dados de campo foram analisados para averiguação de sua consistência. A resistividade aparente foi então calculada com a equação 2. Posteriormente, os dados foram importados para o programa *Sufer 8.02 (Golder Software)*, onde foram interpolados e geradas pseudo-seções. Foram também elaborados mapas de resistividade aparente, paralelos à superfície, em cinco profundidades de investigação. A inversão das pseudo-seções com o programa RES2DINV (GEOTOMO, 2010) não resultou na melhoria de sua qualidade e nem trouxe benefícios em termos de interpretação. Isto provavelmente ocorreu em decorrência da expressiva variação de resistividade aparente em pequenas profundidades na área levantada, o que reconhecidamente dificulta a convergência da solução (GEOTOMO, 2010). Por tal razão, os resultados da inversão não serão apresentados na seção seguinte.

Resultados

As pseudo-seções (Figura 4) e os mapas de resistividade aparente em cinco profundidades teóricas de investigação (Figuras 5a, 5b, 5c, 5d e 5e) mostraram resultados coerentes com os apresentados em levantamento prévio (CPRM, 2001). É importante assinalar que a interpretação de pseudo-seções e mapas requer cautela, pois as anomalias identificadas podem ser distorcidas quanto à forma e dimensão, dadas as características inerentes do método e dos arranjos. Contudo, embora a resistividade varie significativamente, é possível distinguir nas seções porções com resistividade aparente típicas. Os valores de resistividade aparente variaram entre 3 e 200 Ohm.m, com valores mais elevados

Tabela 2: Profundidade média do nível d'água (NA) e do topo da rocha alterada e concentração média de sólidos totais dissolvidos (STD) (no ano hidrológico 2007/2008) em amostras de água subterrânea dos poços de monitoramento situados no vale do córrego dos Coqueiros.

Table 2: Average depth of groundwater (NA) and of the weathered rock top and average concentration of total dissolved solids (TDS) (2007/2008 hydrologic year) of groundwater samples of the monitoring wells in the Coqueiros creek valley.

	PSB2	PSB3	PSB4	PSB5	PM4	PM5	PM7
Cota do poço	863,5	860,0	857,8	862,0	865,1	853,8	863,5
NA (m)	3,1	4,5	2,4	5,8	3,8	1,2	4,3
Rocha alterada (m)	6,8	6,4			16,0	10,0	10,0
STD (mg/l)	360,8	1082,1	780,2	683,9	133,5	172,7	576,5

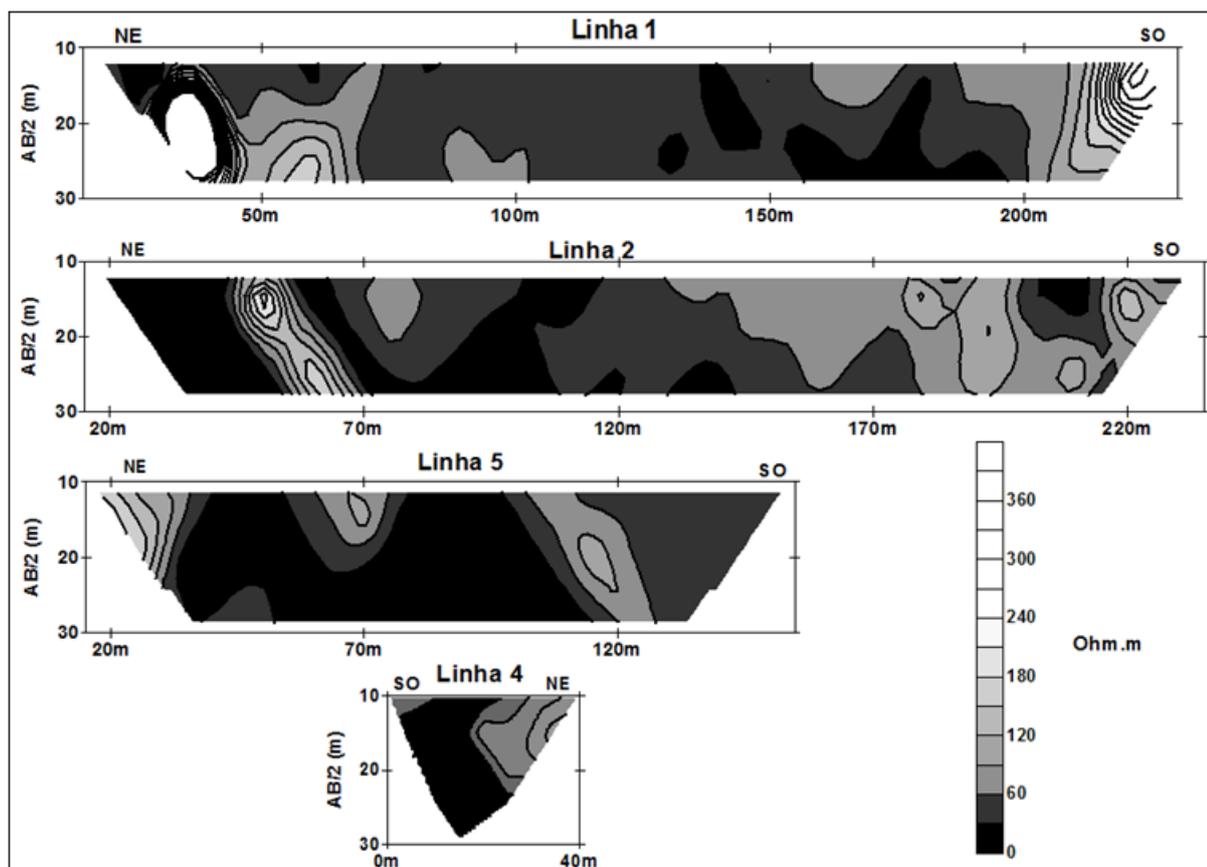


Figura 4: Pseudo-seções de resistividade aparente, correspondentes as linhas L1, L2, L5 e L4, transversais ao córrego dos Coqueiros (localização das linhas na figura 2).

Figure 4: Apparent resistivity pseudosections (Lines L1, L2, L4 and L5) across the Coqueiros creek (lines location in the figure 2)

entre as estações 30 m e 45 m da pseudo-seção 1 e mais baixos na pseudo-seção 5, sobretudo entre as estações 35 m e 115 m (Figura 4).

Na área onde foi executada a geofísica foram encontradas as maiores anomalias dos teores de STD na água subterrânea, com valores muito elevados, como nos poços PSB3, PSB4 e PM7 (Figura 2 e Tabela 2). É importante destacar que os poços PSB3 e PSB4 representam cisternas que permitem acesso a um sistema de canalização e de drenagem de água construído sob o aterro de resíduos. O PSB3 recebe água do sistema de drenos construídos para rebaixar o aquífero sob o aterro e o PSB4 recebe águas do córrego dos Coqueiros, que está parcialmente canalizado a montante deste poço. Ou seja, a água coletada nestas cisternas provém de sistema de drenos ou do córrego canalizado que captam águas de uma área ampla sob as células de resíduos. Em outras palavras, a elevada contaminação identificada nestes dois poços não é necessariamente representativa dos pontos de coleta, podendo se constituir de águas subterrâneas que se exfiltraram em determinados trechos a montante, sob as células do aterro, e que escoaram rapidamente para jusante pelos drenos e canais.

É difícil correlacionar os dados químicos

da água subterrânea dos poços de monitoramento da área com a resistividade determinada com a geofísica, tal como apresentado por MEJU (2000), até porque, considerando-se as ressalvas relativas aos poços PSB3 e PSB4, somente o poço PSB5 foi totalmente coberto por todos os níveis de investigação (Figura 2). Neste caso, constatou-se que os valores de resistividade aparente encontrados na região deste poço (Figuras 5a, 5b, 5c, 5d e 5e) são coerentes com o valor de STD determinados para suas águas (Tabelas 1 e 2).

Assumindo-se que a relação expressa pela equação 4 é aplicável na área do aterro (Tabela 1) e que o *background* geoquímico para STD na região se situa entre 200 mg/l e 300 mg/L, toda as porções com resistividades aparentes inferiores a faixa de 36 a 49 Ohm.m estariam, em tese, contaminadas. Convém destacar que, além do lixiviado, outros bons condutores, como solos argilosos, proporcionam a redução da resistividade aparente. Na região, solos mais argilosos são encontrados no fundo dos vales, como é o caso do fundo de vale do córrego dos Coqueiros, abundante em solos hidromórficos orgânicos e de textura fina (SOUSA, 1998).

Porém, os valores de resistividade mais

Tabela 1: Relação entre STD da água e a resistividade (ρ) de formações arenosas homogêneas de acordo com a relação proposta por Meju (2000).

Table 1: Relationship between TDS and resistivity (ρ) of homogeneous sandy formations according to the equation proposed by Meju (2000).

STD (mg/L)	σ_b (mS/m)	ρ (Ω .m)
200	20,45	48,91
300	27,26	36,68
700	49,72	20,11
1000	64,03	15,62

baixos são decorrentes em grande parte da presença do lixiviado na água subterrânea, já que estes solos mais argilosos se restringem aos horizontes mais superficiais (SOUSA 1998), ao passo que nos mapas de resistividade aparente a resistividade aparente decresce significativamente com o aumento da profundidade (Figuras 5a, 5b, 5c, 5d e 5e).

Assim, numa primeira análise, optou-se por utilizar um limite máximo mais conservador, de 30 Ohm.m, para delimitar áreas com alteração de qualidade em decorrência do lixiviado, valor semelhante aos já empregados para demarcar áreas contaminadas por lixiviado em aterros sanitários (MEJU, 2000, FACHIN, 2007).

O mapa de resistividade aparente na profundidade teórica de 10 m (Figura 5) revela três zonas com baixa resistividade situadas ao longo da base do sopé do talude principal do aterro, que tendem a coalescer para jusante, formando uma mancha com material muito condutivo que acompanha o córrego dos Coqueiros. A zona situada entre os poços PSB3 e PSB4 é mais expressiva, indicando maior aporte de contaminantes por este setor. Os limites entre as zonas de baixa resistividade, contaminadas por lixiviado ($\rho_a < 30$ Ohm.m), e as de resistividade mais alta são retilíneos e pouco contínuos, provavelmente controlados por descontinuidades geológicas, sugerindo que o transporte de contaminantes se dá por caminhos preferenciais, e não de forma homogênea, como pressupõe as modelagens matemáticas feitas anteriormente (SLU, 2005; SLU, 2009).

O mapa de resistividade aparente na profundidade teórica de 15 m revela uma situação análoga, mas com um pequeno acréscimo da área com baixas resistividades ao longo do córrego dos Coqueiros.

Com o aumento da profundidade, verifica-se uma nítida tendência das áreas com baixa resistividade aparente (< 30 Ohm.m) se concentrarem ao longo do vale do córrego dos Coqueiros, formando plumas com larguras progressivamente maiores, culminando num

máximo na profundidade teórica de 30 m, correspondente à profundidade efetiva de investigação de 14,7 m, segundo os procedimentos sugeridos por Edwards (1977), e adotados no programa de inversão RES2DINV (GEOTOMO, 2010). Ou seja, independentemente da profundidade, este nível de investigação alcançaria a rocha alterada, cujo topo se situa em média neste trecho a 10 m de profundidade (Tabela 2).

A modelagem matemática de transporte de contaminantes (SLU, 2009) apontou uma tendência da água contaminada por lixiviado migrar das encostas, na altura dos poços PM7 e PSB3 (Figura 2), em direção à calha do córrego dos Coqueiros, o que foi confirmado pelo levantamento geoeletrico. Pelos dados da modelagem, a pluma resultante seria, então, limitada ao trecho situado entre estes poços, mesmo com cenários de simulação futura longos, de até 20 anos (SLU, 2009). Tal hipótese é corroborada pelo fato do poço PM5, posicionado a jusante (Figura 2), encontrar-se atualmente não contaminado (SLU, 2009), como também pela própria morfologia do vale fluvial, que favorece a convergência do fluxo em direção à calha de drenagem. Isto é reforçado pela observação em campo de exfiltrações do lençol freático nas margens do canal do córrego dos Coqueiros.

Embora muito divergente dos resultados expressos na modelagem matemática (SLU, 2009), até porque os aquíferos tendem a apresentar anisotropias e heterogeneidades, a situação retratada nos mapas de resistividade aparente de 10 e de 15 m de profundidade aponta para uma maior contaminação a montante do córrego, que diminui a jusante, em direção ao poço de monitoramento PM5. O filtro deste poço foi instalado no intervalo de 6 a 10 m de profundidade (SLU, 2005), indicando - segundo os estudos teóricos de Varljen et al. (2006) - que a faixa efetivamente amostrada do aquífero deve se situar entre aproximadamente 4 a 10 m de profundidade. Por outro lado, a forma da pluma estabelecida nos mapas de resistividade aparente de maiores

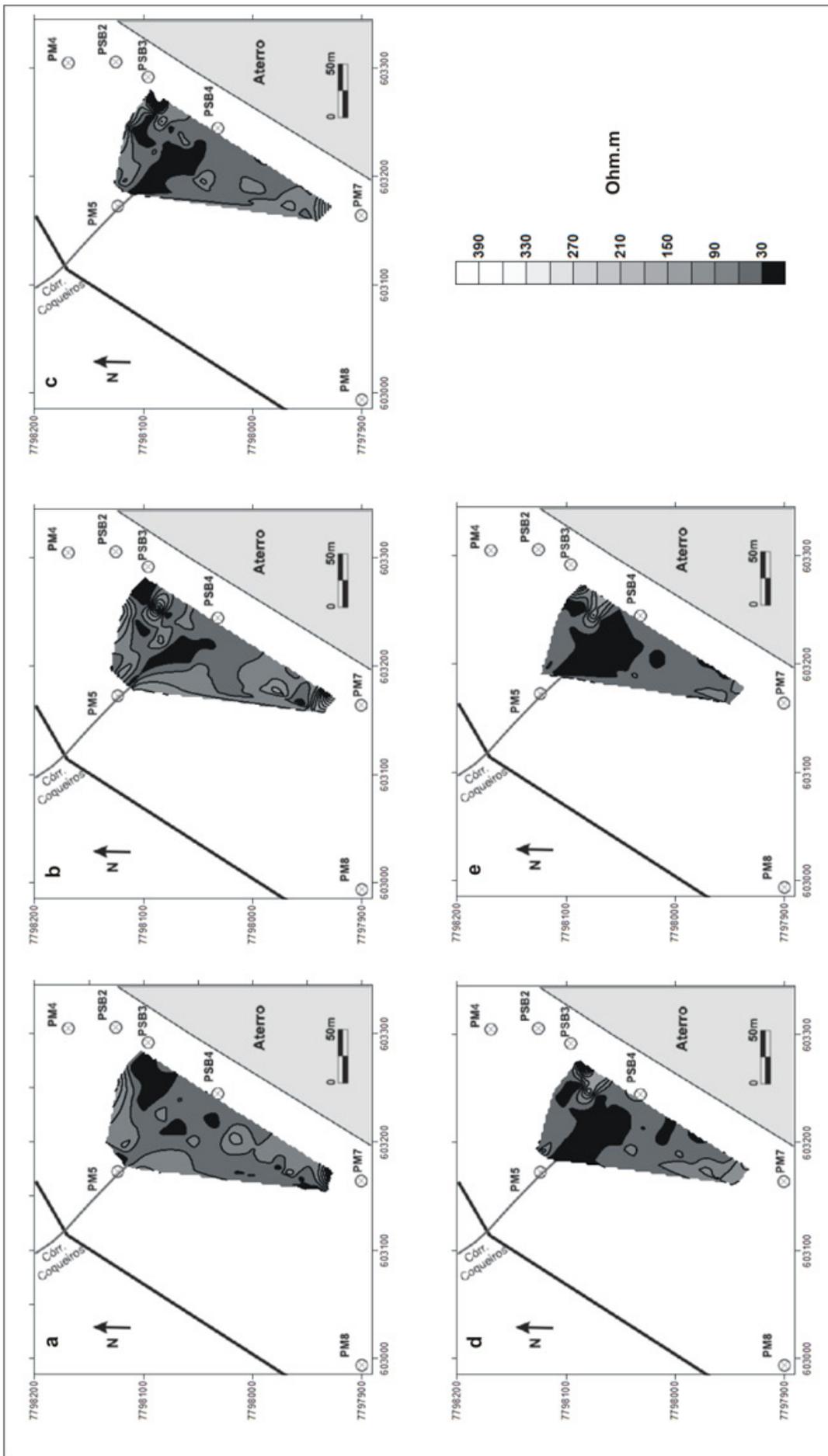


Figura 5: Mapas de resistividade aparente em cinco diferentes profundidades teóricas de investigação: (a) 10m, (b) 15m, (c) 20m, (d) 25m e (e) 30m.
 Figure 5: Maps of apparent resistivity in five different levels of theoretical depth: (a) 10m, (b) 15m, (c) 20m, (d) 25m and (e) 30m.

profundidades teóricas, notadamente a de 30 m, mostra maior grau de contaminação para jusante, inclusive na área do poço PM5. Uma explicação para este comportamento é a tendência das águas contaminadas por lixiviados, mais salinas e, conseqüentemente, mais densas, migrarem descendente para jusante, formando uma cunha contaminada sob águas menos salinas (CHRISTENSEN et al., 2001). A recarga tende a acentuar este comportamento. Neste caso, o intervalo de coleta no poço PM5, com filtros entre 6 e 10 m de profundidade, não seria representativo, pois a zona com águas contaminadas pode se encontrar no fundo do aquífero com porosidade intergranular e, provavelmente, também no topo da rocha alterada. Se confirmada esta interpretação, a pluma contaminada por líquido lixiviado seria mais extensa e profunda que a delimitada anteriormente (SLU, 2009).

Assim, o levantamento geoeletrico ilustrou que a contaminação apresenta elevada variação espacial, causada pela heterogeneidade do maciço e pela própria tendência da pluma se comportar como uma cunha salina. Os dados obtidos demonstram a necessidade de melhorar a caracterização subsuperficial da área através da instalação de novos poços de monitoramento nos trechos com anomalias de baixa resistividade, e que estes sejam multiníveis, objetivando captar a variação vertical da pluma. É recomendável, também, a execução de novas campanhas de geofísica, como, por exemplo, com a repetição do método da eletrorresistividade com profundidades de investigação diferentes, ou de outros métodos geofísicos, como o eletromagnético indutivo.

Conclusões

Os dados do levantamento geoeletrico com arranjo dipolo-dipolo na área do vale do córrego dos Coqueiros imediatamente a jusante do talude principal das células de resíduos permitem concluir que o método selecionado apresentou ótimos resultados para mapear materiais em subsuperfície com diferentes resistividades aparentes. Os solos muito argilosos, como os já identificados nos arredores do córrego dos Coqueiros, normalmente apresentam baixas resistividades, mas o fato da resistividade cair substancialmente com a profundidade indica que a zona de baixa resistividade identificada nos levantamentos deve ser consequência da contaminação da água subterrânea por líquidos lixiviados.

Dados históricos e a correlação com parâmetros químicos da água subterrânea, como

sólidos totais dissolvidos, apontam que o valor de resistividade de 30 Ohm.m é razoável para delimitar zonas contaminadas por lixiviado na área. Confirmou-se, desta forma, as indicações de estudo hidrogeológico prévio (SLU 2009), que apontaram ser a área do vale do córrego dos Coqueiros entre os poços PSB3 e PM7 muito afetada pela contaminação por líquidos lixiviados do aterro sanitário. Contudo, a pluma de contaminação delimitada pela eletrorresistividade não apresenta geometria uniforme, exibindo um padrão irregular e descontínuo, possivelmente condicionado pelas heterogeneidades e anisotropias do substrato geológico. O levantamento geoeletrico confirmou também o efeito do declive topográfico local, que atua direcionando os contaminantes das encostas laterais para a calha do córrego dos Coqueiros, onde são encontradas as menores resistividades aparentes.

A contaminação é maior à montante em menores profundidades (10 a 15 m), porém, à jusante, na profundidade de 30 m, há indícios de que a contaminação possa ter atingido a região do poço PM5, ainda dentro nos limites da CTRS BR-040. Como as análises químicas de água coletadas no poço PM5 indicam águas não contaminadas (SLU, 2009), é possível que esteja ocorrendo o fenômeno do movimento descendente da pluma contaminante, na forma de cunha por diferença de densidade. Neste caso, a contaminação no vale do córrego dos Coqueiros poderá ser maior e mais profunda que a apontada no estudo prévio (SLU, 2009).

Desta forma, os resultados do levantamento geofísico pelo método da eletrorresistividade permitiram delimitar com maior exatidão a extensão da pluma contaminante. Estes resultados permitiram direcionar as etapas futuras de investigação da área, para as quais se recomendou a perfuração de novos poços de monitoramento multiníveis e a execução de novas campanhas de geofísica.

Referências Bibliográficas

- APHA/AWWA/WEF. Standards Methods for the Examination of Water & Wastewater; 21st Edition. American Public Health Association/ American Water Works Association/ Water Environment Federation. Washington. 2004.
- BATISTA, H. P.; CHERNICHARO, P.D.; CATAPRETA, C.A.A. Reintegração de Aterros Sanitários à Paisagem Urbana – A Experiência de Belo Horizonte. In: RESID'2004 – Seminário sobre Resíduos Sólidos, 2004, São Paulo. *Anais...* São Paulo, SP. ABGE, v.1, 9p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518 de 25 de março de 2004. Estabelece normas e o

- padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. *Diário Oficial da União*, Brasília, v. 59, p. 266-270, 26 mar. 2004, Seção 1.
- CHRISTENSEN, T.H.; KJELDEN, P.; BJERG, P.L.; JENSE, D. L.; CHRISTENSEN, J.B.; BAUN, A.; ALBRECHTSEN, H-J; HERON, G. Review: Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, 16, p 659-718, 2001.
- COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais. **Projeto: Resultado de análises de água de cisternas e poços artesianos dos imóveis localizados na área de influência do aterro sanitário. Relatório Final.** Belo Horizonte. 2002. Projeto Concluído.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Pampulha - Estudo hidrogeológico da Bacia da Lagoa da Pampulha. Programa Informações Básicas para a Gestão Territorial. Relatório Final.** Belo Horizonte. 2001. CPRM/Prefeitura Municipal de Belo Horizonte/Prefeitura Municipal de Contagem. Projeto Concluído.
- EDWARDS L. S. A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 3, 78-95, 1977.
- ELIS V.R. **Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos**, 1998, 264p. Tese de Doutorado. IGCE - UNESP.
- ELIS, V.R.; MENDONÇA, C.A; PORSANI, J.L; STROBINO, E. O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósitos de resíduos. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro (RJ), v. 26, n. 3, p. 317-325, 2008.
- ELIS, V.R.; ZUQUETTE, L.V. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. *Revista Brasileira de Geologia*, São Paulo (SP), v. 32, n. 1, p. 119-134, 2002.
- FACHIN, S.J.S. Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação dos parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema, 2007, 165p., Dissertação de Mestrado. IAG -USP.
- GEOTOMO - GEOTOMO SOFTWARE - RES2DINV Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Manual. Disponível em: <<http://www.geoelectrical.com/downloads.php>>. Acesso em 05 fev 2010.
- KJELDEN, P.; BARLAZ, M.A.; ROOKER, A.P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T.H. Present and Log-term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. **Critical Review in Environmental Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002
- MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A.C.O.; DOURADO, J.C.; LOURENÇO JÚNIOR, J.C.R. Emprego de métodos geofísicos na caracterização e análise ambiental do aterro sanitário de Jundiá SP. *Geociências*, v. 19, n.1, p. 123-132, 2000.
- MEJU, M. 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.
- MEJU, M. Geoelectrical characterization of covered landfill sites: a process-oriented model and Investigative approach. **Applied Hydrogeophysics, NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, Dordrecht (Netherlands)**, v. 71, n. 11, 319-341, v.71, 2006.
- MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental/Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG, no 02, de 08 de setembro de 2011. Institui o Programa Estadual de Gestão de Áreas Contaminadas. *Diário Executivo “Minas Gerais”*, p 1-17, 16/09/2010.
- MOURÃO, M. A. A. **Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG**, 2007, 299p. Tese de Doutorado, IGC- UFMG.
- ORELLANA E. 1972. Prospección geoelectrica en corriente continua. Ed. Paraninfo, 523p.
- ROBINSON, E.S; ÇORUH, C. **Basic exploration geophysics.** John Wiley & Sons, 1988.
- SEATON, W. J.; BURBEY, T. J. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrene. *Journal of Applied Geophysics*, v. 51, p. 21-41, 2002.
- SILVA, A. B.; CARVALHO, E. T.; FANTINELI, L. M.; ROMANO, A. W.; VIANA, C. S. **Projeto: Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais integrados no Município de Belo Horizonte. Relatório Final.** UFMG/IGC/FUNDEP, Belo Horizonte, MG, 1995, 150p.
- SLU - SUPERINTENDÊNCIA DE LIMPEZA URBANA. **Projeto: Diagnóstico hidrogeológico preliminar para avaliação do potencial de contaminação. Relatório Final.** Belo Horizonte. 2005. Tecisan. Projeto Concluído.

- SLU - SUPERINTENDÊNCIA DE LIMPEZA URBANA. **Projeto: Caracterização definitiva da pluma de contaminação da águas subterrâneas da área do aterro sanitário da CTRS-BR040. Relatório Final.** Belo Horizonte. 2009. CTQ Análises Químicas e Ambientais. Projeto Concluído.
- SOUSA, H. A. **Estudo da contaminação ambiental na área do aterro sanitário da BR-040, da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.** 1998, 147p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A. **Applied Geophysics.** Cambridge: Cambridge University Press, 1976.
- VAN BREUKELLEN, B. M. **Natural Attenuation of Landfill Leachate: a Combined Biogeochemical Process Analysis and Microbial Ecology Approach.** Amsterdam, 2003, 154p. Tese de Doutorado, Vrije University, The Netherlands.
- VARLJEN, M.D.; BARCELONA, M.J.; OBEREINER, J.; KAMINSKI, D. Numerical Simulations to Assess the Monitoring Zone Achieved during Low-Flow Purging and Sampling. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v.26, n. 1, p. 44-52, 2006.

Agradecimentos

À Superintendência de Limpeza Urbana, pela disponibilização dos dados referentes ao aterro da CTRS da BR-040, à FAPEMIG (processo PPM 203-08) e ao CNPQ (processo 307132/2008-0), pela concessão de bolsas de pesquisa.

