

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO (ELETRORRESISTIVIDADE) NOS LIMITES DO ATERRO CONTROLADO DO JOKEY CLUBE, VILA ESTRUTURAL, BRASÍLIA – DF

Marcio Maciel CAVALCANTI¹, Welitom Rodrigues BORGES¹, Reiner STOLLBERG², Marcelo Peres ROCHA¹, Luciano Soares da CUNHA¹, Eduardo Xavier SEIMETZ¹, Pedro Vencovsky NOGUEIRA¹ e Frederico Ricardo Ferreira Rodrigues de OLIVERA E SOUSA¹

- (1) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília Campus Universitário Darcy Ribeiro. Instituto Central de Ciências – ICC. CEP 70.910-900 – Brasília DF. Caixa Postal 04465. CEP 70919-970. Endereços eletrônicos: marciom.cavalcanti@hotmail.com; welitom@unb.br; marcelorocha@unb.br; lucianosc@unb.br; eduseimetz@unb.br; pvencovsky@gmail.com; fredericosousa@phygeo.com.
- (2) Centro Helmholtz para Pesquisa Ambiental – UFZ. Departamento de Águas Subterrâneas e Remediação, Alemanha. Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Alemanha. Endereço eletrônico: reiner.stollberg@ufz.de.

Introdução

Aplicações de métodos geofísicos a aterros
Eletrorresistividade
Técnica de Medição

Métodos e técnica

Área de estudo
Histórico do Aterro JCB
Geologia da Área

Resultados e interpretações

Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - A capital do Brasil descarta seus resíduos sólidos em uma área que foi inicialmente um lixão e atualmente é administrada como aterro controlado. O aterro controlado do Jokey Clube de Brasília (JCB) não possui nenhum tipo de impermeabilização do terreno, tendo um passivo ambiental de 40 anos. O aterro do JCB já ultrapassou o limite suporte para a deposição de resíduos sólidos, mas continua sendo utilizada. Os métodos geofísicos são bastante empregados em investigações ambientais devidos os materiais poluentes apresentarem uma boa variação de contraste das propriedades físicas entre o meio que são dispostos. Neste trabalho foram utilizados os métodos de eletrorresistividade, no delineamento da pluma de contaminação por chorume. As seções de eletrorresistividade apresentaram valores de baixa resistividade e relacionada a valores de análise físico – química da água coletada em poços de monitoramento, foram associadas à presença da pluma de contaminação.

Palavras-chave: eletrorresistividade, chorume, pluma de contaminação.

ABSTRACT - The capital of Brazil dispose of their waste in an area that was originally used as a garbage dump and is now managed as a landfill. The waste disposal Jokey Club in Brasília not have any kind of waterproofing, and an environmental liability of 40 years. The landfill Jokey Club (JCB) exceeded the limit of deposition, but is still used for dumping waste from a region that does not stop growing. Geophysical methods are extensively used in environmental research due polluting materials present a good contrast variation of the physical properties of the medium that are willing. In this work we used the methods of electrical resistivity in the delineation of the plume of contamination by leachate. The sections showed values resistivity low and values related to analysis of physical - chemical water collected in monitoring wells, were associated with the presence of the contaminant plume.

Keywords: resistivity, landfill contamination plume.

INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos são comumente atribuídos a todos os resíduos de atividade humana que são indesejáveis, descartáveis e inúteis. Sempre apresentados na forma sólida, semissólida e semilíquida. Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a definição de resíduo sólido se estende a todo o material descartável de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços de varrição. Sendo sua classificação nas classes: perigosa, não perigosa e inerte (NBR 10.004, 2004).

O aumento do volume de resíduos sólidos urbanos ocasiona muitos problemas ambientais relacionados aos métodos de sua disposição e estocagem, que se inadequados, provocam a contaminação do solo e das águas subterrâneas. Esta contaminação é causada essencialmente pelo lixiviamento dos metais pesados presentes nos resíduos sólidos os quais são constituídos por compostos orgânicos, pilhas, baterias, resíduos hospitalares e industriais, entre outros. Estes metais pesados, em conjunto com o líquido proveniente da decomposição de materiais orgânicos constituem o chorume.

O chorume é um produto da biodegradação da matéria orgânica contida dos resíduos sólidos, representado por um líquido rico em sais e bactérias, água de constituição e pela intrusão da água de chuva. Conforme Tchobanoglous *et al.* (1993) a água é o principal fator de formação do chorume e que sua introdução no aterro ocorre nas condições de precipitação, escoamento superficial, variação do nível freático e líquidos provenientes das ações de biodegradação.

As áreas para disposição de resíduos sólidos podem apresentar contaminação pela superfície, atravessando a estrutura não saturada do solo e a zona capilar atingindo a zona saturada do solo. A zona não saturada é preenchida por espaços vazios e água, nesta zona o fluxo da água depende principalmente da força gravitacional e da forma dos poros, favorecendo a percolação para partes mais profundas da área de deposição. Na zona saturada os poros são totalmente preenchidos

por água e a percolação ocorre principalmente no sentido do fluxo do gradiente hidráulico. Os contaminantes podem atingir longas distâncias, cobrindo extensas áreas, após longos períodos de tempo. Este é caracterizado como plumas de contaminação com variações no espaço e tempo, dependente das condições hidrogeológicas da área (OLIVEIRA e BRITO, 1998).

O chorume proveniente de aterros recentes é caracterizado por altos níveis de ácidos orgânicos, amônia e sólidos totais dissolvidos, mas grande parte da massa biodegradada é fragmentada com o tempo, e a concentração destes parâmetros decresce no material lixiviado de aterros antigos (FARQUHAR, 1989; BIRKS e EYLES, 1977). Na Tabela 1 são apresentados os valores dos parâmetros químicos e físicos encontrados no chorume e o decaimento dos valores conforme a idade do chorume.

Tabela 1. Mudanças típicas nas concentrações de chorume com a idade do resíduo (FARQUHAR, 1989; BIRKS e EYLES, 1997).

| Parâmetro (mg/L) | Idade do Resíduo | | | |
|---------------------|------------------|---------------|--------------|-----------|
| | 0– 5 anos | 5 – 10anos | 10 – 20 anos | > 20 anos |
| STD* | 10000 – 25000 | 5000 – 10000 | 2000 – 5000 | > 1000 |
| pH | 5 - 6 | 6 -7 | 7 – 7.5 | 7.5 |
| DBO | 1000 – 25000 | 1000 – 4000 | 50 – 100 | < 50 |
| DQO | 15000 – 40000 | 10000 – 20000 | 1000 – 5000 | < 1000 |
| N Amoniacal | 500 – 1500 | 300 – 500 | 50 – 200 | < 30 |
| P total | 100 – 300 | 10 – 100 | - | < 10 |
| Cloretos | 1000 – 3000 | 500 – 2000 | 100 – 500 | < 100 |
| Sulfatos | 500 – 2000 | 200 – 1000 | 50 – 200 | < 50 |
| Cálcio | 2000 – 4000 | 500 – 2000 | 300 – 500 | < 500 |
| Sódio+ potássio | 2000 – 4000 | 500 – 1500 | 100 – 500 | < 100 |
| Magnésio + Ferro | 500 – 1500 | 500 – 1000 | 100 – 500 | < 100 |
| Zinco + Alumínio | 100 – 200 | 50 – 100 | 10 – 50 | < 10 |
| Alcalinidade | 10000 – 15000 | 1000 – 6000 | 500 – 2000 | < 500 |

*SDT – Sólidos Totais Dissolvidos

Conforme Elis (1999), vários estudos foram realizados, na década de 70, na América do Norte e Europa, onde os problemas de poluição de águas subterrâneas eram causados por aterros de resíduos sólidos. Os aterros instalados em arenitos, conglomerados e rochas fraturadas apresentaram contaminação dos aquíferos pela percolação do chorume.

As contaminações em subsuperfície são, frequentemente, os locais em que ocorrem anomalias eletricamente condutivas, devido ao aumento do conteúdo iônico diluído nos fluídos. Um dos protocolos ambientais eficientes na localização de áreas contaminadas por lixiviação de resíduos sólidos usa os métodos geoeletricos (eletrorresistividade, eletromagnéticos e o radar de penetração no

solo), uma vez que o choro é riquíssimo em íons (CETESB, 2001).

Meju (2000) elaborou um modelo de resistividade *versus* profundidade conceitual para aterros sanitários antigos e abandonados. Foram incorporados resultados geotécnicos, geoquímicos e hidrogeológicos dos comportamentos espaços-temporais do choro, em um contexto geoeletrico. O autor observou que nas áreas inferiores do subsolo,

onde ocorre a penetração do lixiviado, há um aumento da temperatura, o que favorece o aumento da atividade bacteriana, e, por conseguinte, aumento das reações de troca iônica nas partes mais inferiores das áreas do aterro. O modelo de resistividade foi desenvolvido em relação às interações entre o biogeoquímico e a hidroquímica nas áreas dos aterros de resíduo sólidos, resultando em várias zonas (Figura 1).

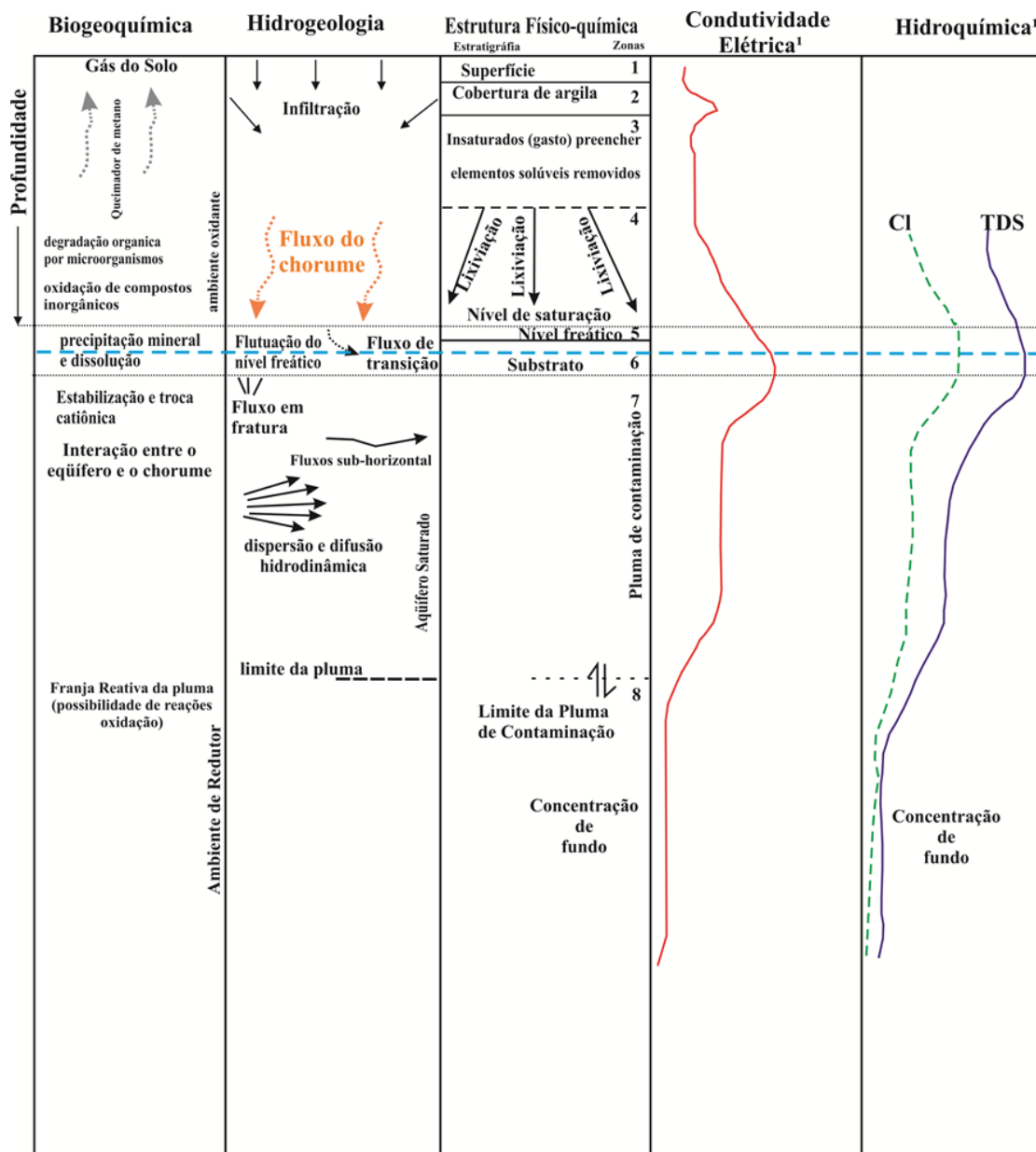


Figura 1. Modelo de resistividade conceitual para aterros antigos com a produção de chorume e migração para o sistema de águas subterrâneas (MEJU, 2000).

Neste trabalho utilizou-se o método geoeletrico por eletrorresistividade para localizar e delinear a pluma de contaminação

nos limites da área do Aterro controlado do Jokey Clube de Brasília (JCB), localizando no Distrito Federal.

Aplicações de métodos geofísicos a aterros

Os métodos de investigação geofísica são bastante utilizados na detecção, monitoramento e delimitação de plumas contaminantes por líquidos percolados dos depósitos de resíduos urbanos e industriais. Na década de 60 vários estudos e pesquisas demonstraram os benefícios do uso da técnica de eletrorresistividade em dimensionar um corpo de águas subsuperficiais contaminado. Este método mostrou-se mais rápido e de baixo custo em relação aos métodos diretos anteriores de amostragem de água coletadas em poços (Stollar & Roux, 1975).

A aplicação de métodos geoeletricos em estudos ambientais é amplamente relatada na literatura, podendo citar Cartwright e McComas (1968), Kelly (1976), Urish (1983), Mendes (1987), Vogelsang (1995) e Reynolds (1997).

Franco (1996) mostrou, com o uso de sondagens elétricas verticais (SEVs), que o chorume produzido pelo resíduo do aterro Jokey Clube de Brasília (JCB), contaminou a água subterrânea que flui tanto no sentido do córrego Cabeceira do Valo quanto no sentido do Parque Nacional de Brasília.

Araújo (1996) mostrou, através de análises químicas de águas subterrâneas, coletadas em poços de monitoramento, que há uma maior lixiviação do chorume nos meses de alta precipitação pluviométrica, evidenciando a alta permeabilidade dos solos da região.

Estudo realizado na Inglaterra, Chambers (1999), com o objetivo de investigar três escavações para descarte de resíduos industriais, em um substrato argiloso. Os resultados apresentaram valores baixos de condutividade (< 100 mS/m) na parte superficial das escavações, relacionada ao material inerte de preenchimento da cava. Na parte inferior das cavas os valores de alta condutividade (> 66 mS/m) foram associados à contaminação pelos resíduos industriais.

Shiraiwa et al. (2002) realizaram uma investigação geofísica no lixão desativado de Cuiabá – MT. Os pesquisadores utilizaram os métodos de Eletrorresistividade, Eletromagnético e Radar de Penetração no Solo (GPR). Os resultados revelaram a contaminação pelo chorume, desde a superfície até o nível freático, os valores de delimitação da pluma foram interpretados com os valores baixos de resistividade (< 20 ohm.m), valores altos de

condutividade (> 60 mS/m) e áreas de atenuação do sinal do GPR.

Moura e Malagutti Filho (2003) realizaram ensaios geofísicos pelos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida (domínio do tempo), na área do aterro controlado da cidade de Rio Claro-SP. Os valores de baixa resistividade encontrados são associados às elevadas concentrações de íons cloreto, e outros íons, como o sódio, sulfatos e nitratos que contribuíram para o aumento da condutividade elétrica do contaminante. A análise da polarizabilidade permitiu distinguir os diferentes litotipos predominantes da área, identificando baixa polarizabilidade para os materiais silte-arenosos e altos valores para os materiais silte-argilosos, como também a presença de materiais polarizáveis dispostos nas cavas (latas, papéis, vidro, seringas, pilhas e componentes elétricos descartados). Os resultados descreveram uma interpretação conjunta da resistividade e da polarizabilidade, reduzindo a ambiguidade dos modelos geoeletricos permitindo determinar a geometria das cavas de resíduos, zonas de percolação de chorume e a diferenciação dos litotipos das formações identificando materiais arenosos e siltosos.

Fachin *et al.* (2006) empregaram os métodos de eletrorresistividade, eletromagnético indutivo e GPR para determinar e localizar áreas potencialmente contaminadas com os resíduos sólidos e provenientes da indústria do couro, localizado próximo ao limite da área urbana de Várzea Grande – MT. Os resultados permitiram classificar os intervalos de resistividade, condutividade elétrica e sinal do GPR com o grau de contaminação (Tabela 2). O uso dos métodos geofísicos aliados à informação geológica de superfície e de poços mostrou uma eficiente ferramenta de análise preliminar na identificação de áreas potencialmente contaminadas.

Moreira (2009) utilizou métodos geofísicos de eletrorresistividade, Polarização Induzida e Potencial Espontâneo sobre valas de resíduos fechados anualmente, no aterro controlado do município de Cordeirópolis (SP). Foi observado que a degradação de resíduos sólidos e seus subprodutos alteram as propriedades físicas do meio geológico, sendo

associado a uma relação direta entre queda nos valores de resistividade e elevados concentrações de chorume. A resistividade apresentava baixos valores onde as valas eram mais recentes e aumento progressivo, da resistividade, nas valas mais antigas. Os resultados indicaram o período de 12,25 anos

para a estabilização dos valores de resistividade aos níveis naturais. Sendo que em 8,7 anos, após o fechamento da vala de resíduos, a geração do chorume debilita-se e passa a percolar o fundo das valas, até o consumo completo da matéria orgânica e termino da contaminação após 12,25 anos.

Tabela 2. Classificação para as áreas contaminadas de acordo com intervalos de resistividade elétrica, condutividade elétrica aparente e atenuação da onda eletromagnética do GPR (FACHIN *et al.*, 2006).

| Classificação | σ (mS/m) | ρ (ohm.m) | Atenuação no Sinal do GPR |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|
| AC – Área Contaminada | > 40 | < 30 | Alta |
| AS – Áreas Suspeitas de Contaminação | 20 a 40 | 30 a 50 | Média |
| AN – Área Não Contaminada | < 40 | > 50 | Baixa |

Os métodos geofísicos revelam-se os mais aplicados neste tipo de investigação em áreas para disposição de resíduos sólidos, mostrando ser uma ferramenta versátil e de qualidade, com baixo custo de aplicação.

Diante da existência de contaminação do solo para além dos limites do aterro JCB, indicada pelos trabalhos anteriormente realizados, e ainda, que esses foram desenvolvidos há mais de uma década, objetivou-se um levantamento mais abrangente e atual nos limites do aterro JCB, para o delineamento da pluma de contaminação.

Eletrorresistividade

Pertencente ao grupo dos métodos geoeletricos, a eletrorresistividade é um método geofísico que usa uma fonte artificial de corrente elétrica, a qual é introduzida nas camadas da subsuperfície do solo por meio de eletrodos fixados na superfície do solo (Gallas, 2005). A eletrorresistividade tem sua origem no ano de 1920 pela aplicação do método pelos irmãos Schlumberger (Telford, Geldart e Sheriff, 1990). Este método consiste na injeção de corrente elétrica em subsuperfície por meio de aterramento galvânico, através de 2 eletrodos (A e B), produz uma diferença de potencial que é medido por outros 2 eletrodos de potencial (M e N). Os valores medidos da diferença de potencial e da corrente injetada resultam nos valores da resistividade aparente do solo (Orellana, 1972). A eletrorresistividade é usada no estudo de descontinuidades horizontais e verticais nas propriedades

elétricas do solo e também na detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala (Kearey *et al.*, 2009).

A corrente elétrica propaga-se fisicamente, pelos materiais, através de três modos de condução (Keller; Frischknecht, 1966): condução eletrônica (Ôhmica), condução eletrolítica (iônica) e a condução dielétrica. Dentre este três a condução eletrolítica é o tipo de condução predominante nas rochas, tendo os espaços porosos a ocorrência do fluxo da corrente por solução iônica. Este modo de condução tem uma maior importância nos estudos e levantamentos geofísicos de eletrorresistividade (Telford *et al.*, 1990) No geral, a condutividade é eletrolítica, e acontece ao longo da umidade e porosidade contidas dentro da matriz isolante (McNeill, 1980).

Técnica de Medição

A medição da resistividade elétrica em subsuperfície é feita através de vários modos de arranjos ou dispositivos geoeletricos estes variam em sua forma de espaçamento entre os eletrodos. Neste estudo foi utilizado o arranjo Dipolo-dipolo.

No arranjo Dipolo-dipolo os eletrodos de corrente (A e B) são colocados em linha com os eletrodos de potencial (M e N). A distância entre os eletrodos A e B e M e N, são iguais (a), e a distância entre B e M é 'n vezes a', sendo múltiplos de 'a'. A vantagem do arranjo Dipolo-dipolo é que o fator de variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis de profundidade, tendo uma melhor

resolução vertical. O arranjo dipolo-dipolo é muito utilizado em estudos ambientais para a caracterização lateral e em profundidade de plumas de contaminação (Braga, 1999).

Sabe-se que na natureza os substratos não são homogêneos e tão pouco isotrópicos. Considerando que os eletrodos (A, B, M e N) estão posicionados em locais com valores de resistividade antagônicos, a resistividade resultante medida não será a verdadeira e sim uma resistividade dita aparente ρ_a . Esta não será igual a nenhum dos quatro valores de resistividade, mas terá influência de todos eles e

de suas respectivas configurações e geometrias (Orellana, 1972).

As medidas de resistividade são normalmente apresentadas pela interpolação dos contornos de isovalores, resultando em pseudo-seções (Hollof, 1957) onde são apresentados os valores de resistividade em subsuperfície. Posteriormente são aplicados processos de inversão, obtendo uma seção de anomalias resistivas mais preciso devido o processo de inversão resultar em um modelo de distribuição real dos valores de resistividade (Gallas et al, 2005).

MÉTODOS E TÉCNICA

Área de estudo

A área de estudo localiza-se em Brasília, DF (Figura 2). A principal via de acesso ao Aterro do Jokey Clube de Brasília (JCB) é a Rodovia EPCL-DF-096/BR-070, conhecida como Via Estrutural, que liga o Plano Piloto às cidades de Taguatinga, Ceilândia e Brazlândia.

A área do Aterro JCB tem um formato trapezoidal, com o vértice do topo triangular

apontando, aproximadamente, para o noroeste. Ao sul encontra-se uma porção de terra, que no passado fez parte do Aterro, hoje se encontra habitada por famílias de baixa renda. A oeste do Aterro está o córrego Cabeceira do Valo e uma região de chácaras, de pequena produção hortifrutigranjeira. A leste e ao norte está o córrego do Acampamento e a área do Parque Nacional de Brasília (PNB).

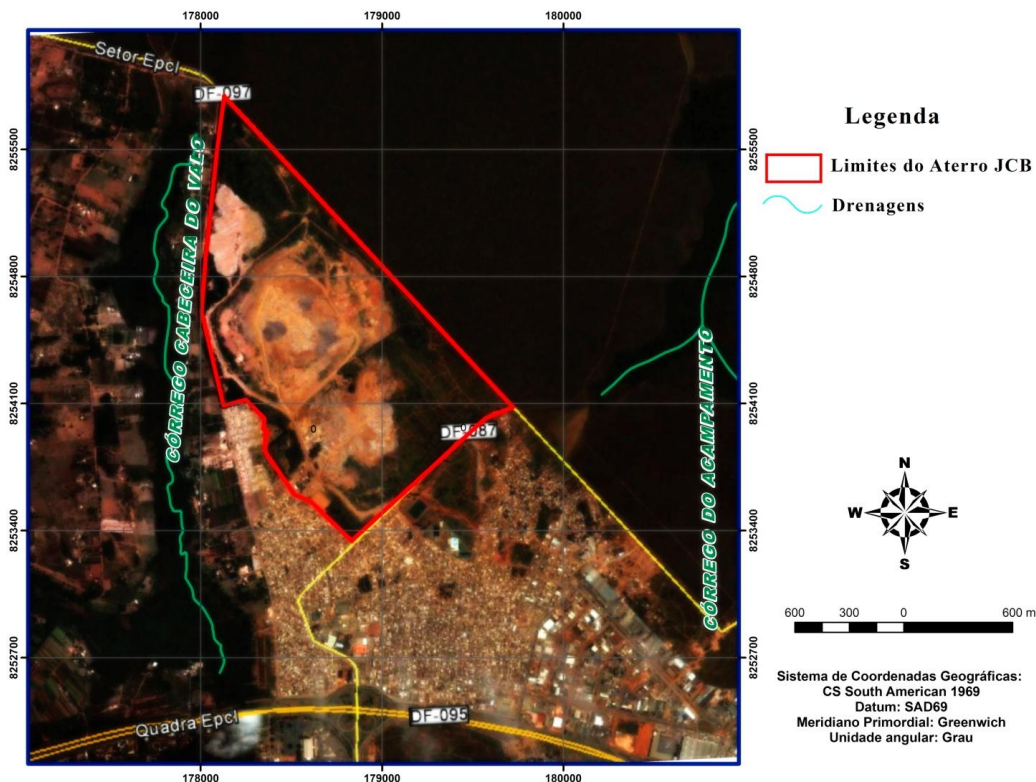


Figura 2. Mapa de localização do Aterro Controlado do Jokey Clube em Brasília/DF. Imagem do Google Earth de 21 de outubro de 2012.

Histórico do Aterro JCB

No período de 1977 a 1978 o lixo foi depositado a céu aberto em trincheiras, utilizando o método de rampas, onde o próprio solo retirado para a abertura de uma célula era usado para cobrir a célula adjacente já utilizada. A profundidade das trincheiras era variada em 2 a 4 metros, e o lixo depositado era compactado e recoberto com uma camada de solo de aproximadamente 50 cm de espessura. Atualmente esta área encontra-se fora dos limites atuais do Aterro JCB, sendo habitada por moradores que utilizam água de poços do tipo cacimba (SANTOS, 1996).

De 1978 a 1995 a deposição do lixo se estendeu nas direções NE e SW (próximo ao vale do córrego Cabeceira do Vale), sendo considerada a porção intermediária do Aterro

(Figura 3). O lixo foi depositado em valas com 20 a 30 m de largura, 100 a 80 m de comprimento e 2 a 3 m de profundidade (SANTANA e IMAÑA-ENCINAS, 2004). No início de 1995, a disposição do lixo no Aterro JCB cobriu toda a área intermediária, sendo observado o prolongamento da área de deposição em direção à porção norte do Aterro.

De 1995 a 1996 a porção norte foi completamente coberta pelo depósito de lixo. Conforme Koide e Bernardes (1998) relatam que, a espessura das camadas de lixo nesta região eram superiores as porções mais antigas, devido à escassez de área disponível (Figura 3).

De 1996 até hoje, parte da porção intermediária, é utilizada para a deposição do lixo, através do “método da área”, que o empilhamento do lixo em tronco piramidal.

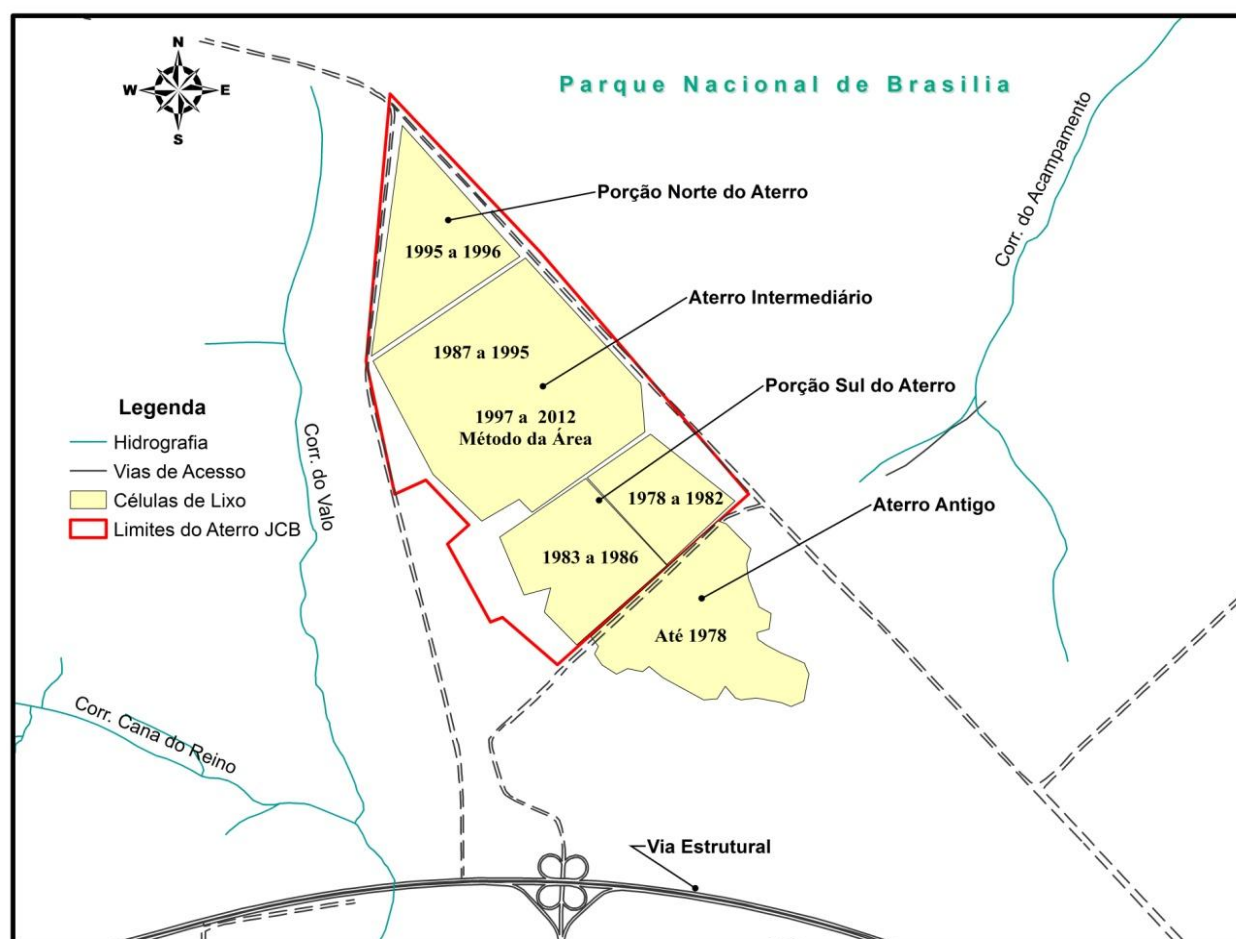


Figura 3. Deposição temporal do lixo na área do Aterro do JCB (SANTOS, 1996).

Geologia da Área

A geomorfologia da área é associada a um relevo suave ondulado com declividade de 10%, com presença de rampas longas e predominância de pedogênese sobre o

transporte e deposição. A área é um divisor hidrográfico (Figura 4) com dois corpos hídricos, o Córrego Cabeceira do vale, a sudoeste e o Córrego do Acampamento, a nordeste (Campos, 2007).

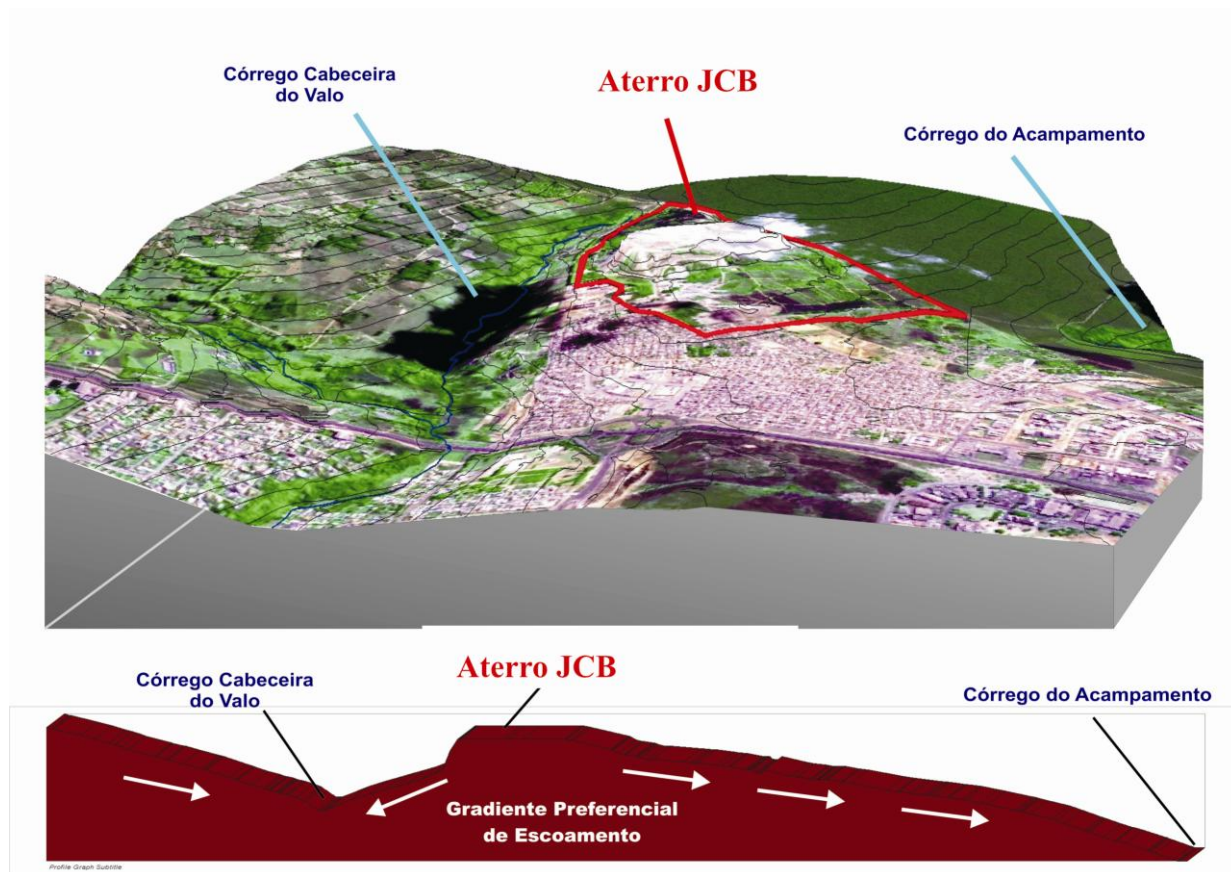


Figura 4. Perfil topográfico do Aterro JCB no sentido oeste-leste. Visada para norte.

Conforme Campos (1998), o Grupo Paranoá é a unidade geológica que ocupa a maior área no Distrito Federal, dividida em seis unidades estratigráficas: a Ardósia, o Quartzito Médio, o Metarritmito Argiloso, o Metassiltito Argiloso, o Metarritmito Arenoso e a Psamopélito Carbonata. Os cavalgamentos ocasionaram inversões estratigráficas no DF, onde o Grupo Canastra ocorre sobre os grupos Paranoá e Bambuí, o Grupo Paranoá sobre o Grupo Bambuí e o Grupo Araxá sobre o Grupo Paranoá. Segundo Freitas-Silva e Campos (1998), os grupos Canastra e Paranoá são unidades cronocorrelatas dispostas lateralmente, e os grupos Araxá e Bambuí possuem sedimentações cronocorrelatas depositadas em bacias, formando porções mais internas e externas, dentro da Faixa Brasília (Figura 5). A área do Aterro JCB é representada por ardósia da Unidade A e por metarritmito da Unidade R₃ do Grupo Paranoá. Tendo a predominância de ardósias roxas, friáveis, com dupla clivagem definida e de camadas restritas arenosas. Nas proximidades do Córrego Cabeceira do Valo ocorre a presença de

metarritmitos intemperizados com intercalação entre camadas argilosas a arenosas (Campos *et al.*, 2006).

Pereira et al. (1997) na elaboração de estudos geológico-geotécnico na área do Aterro JCB, constatou a ocorrência de Latossolo Vermelho-Escuro com espessuras entre 10 a 15 metros em solo residual laterítico, e com espessuras entre 15 a 25 metros quando solo é coluvionar laterítico, ambos com porosidade elevada e variação de permeabilidade entre 10^{-4} e 10^{-6} cm/s, tendendo a diminuição dos valores com a profundidade. É relatada a presença de nível laterítico descontínuo (cascalho marrom escuro), ocorrendo no topo dos solos saprolítico e na zona de oscilação do nível freático, com espessura média de 2 metros. Há ocorrência de solo Saprolítico de coloração roxo, marrom e branco, caracterizado por baixa porosidade e permeabilidade de campo inferior a 10^{-6} cm/s, originado de rochas ardósianas com Fácies Ardósia da Sequência Depositional Paranoá. Por fim o autor descreve a presença de solo Saprolítico de quartzito (na porção sudoeste do Aterro JCB) derivado de rochas quartzíticas

pertencente à Fácies Ardósia da Sequência Depositional Paranoá, com permeabilidade entre 10^{-3} a 10^{-4} cm/s, com ocorrências

intercaladas nas ardósias apresentando-se em pequenas lentes ou lentes de grandes dimensões.

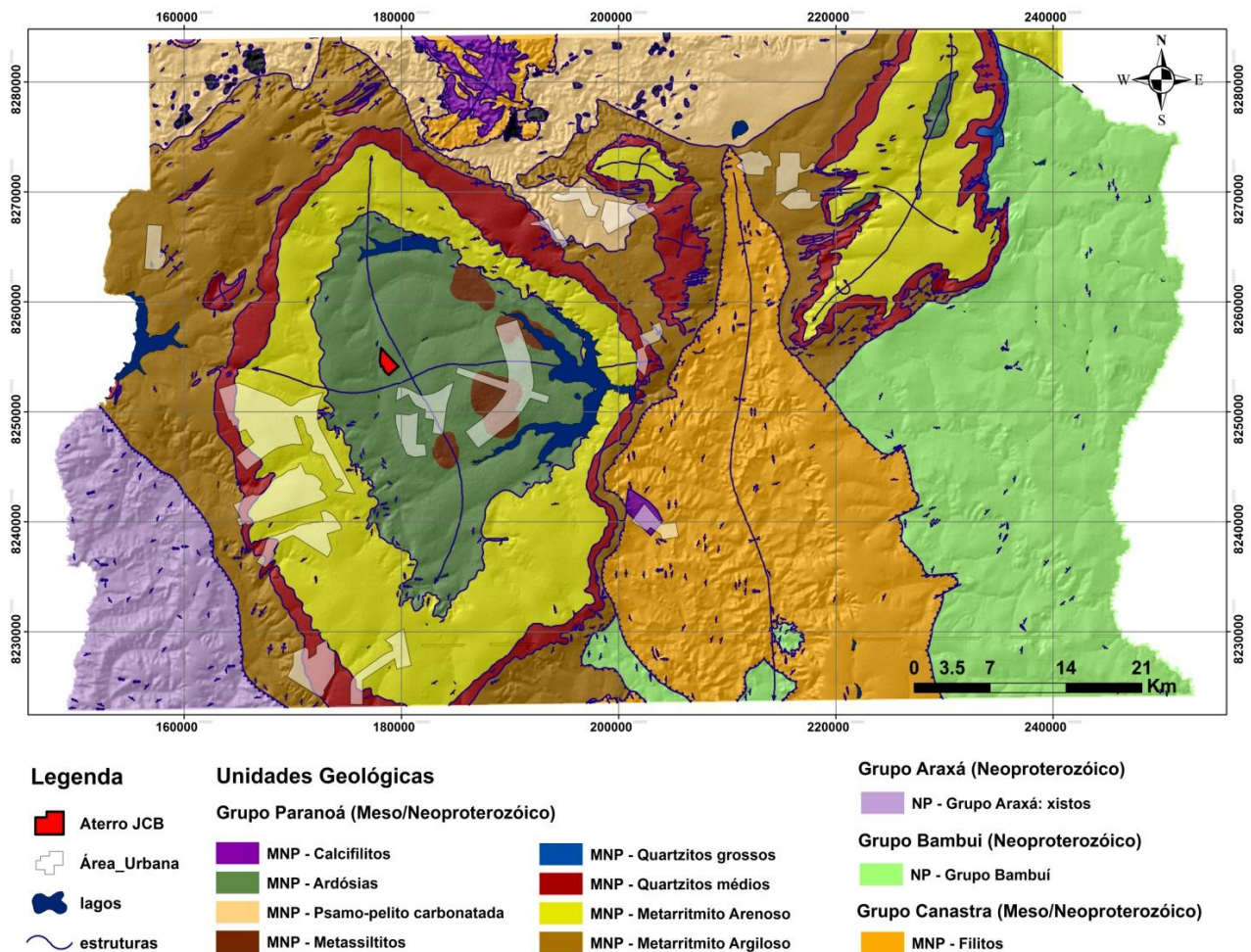


Figura 5. Mapa das Unidades Geológicas do Distrito Federal. Adaptado de Freitas Silva e Campos (1998).

As aquisições das seções de eletrorresistividade foram realizadas nos limites externos do Aterro JCB utilizando-se a técnica de caminhamento elétrico e arranjo Dipolo-dipolo, totalizando 15 seções nomeadas de Linhas EL1 a EL15 (Figura 6). O protocolo de aquisição de dados com o cabo multieletrodos

foi elaborado no programa ELECTRE II, versão 05, da IRIS Instruments para as aquisições com 54 eletrodos ou 36 eletrodos. Os espaçamentos utilizados assim como os números de níveis de investigação e quantidade de pontos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Características do protocolo de aquisição das seções de eletrorresistividade, para obtenção dos dados no Aterro do JCB.

| Seções | Quantidade de eletrodos | Espaçamento | Quantidade de pontos | Níveis de investigação |
|--------------------------|-------------------------|-------------|----------------------|------------------------|
| EL1 a EL9 EL11 a EL13 | 54 | 10 | 1784 | 30 |
| EL10 e EL10A | 36 | 10 | 765 | 29 |
| EL14 e EL15 | 36 | 05 | 572 | 25 |

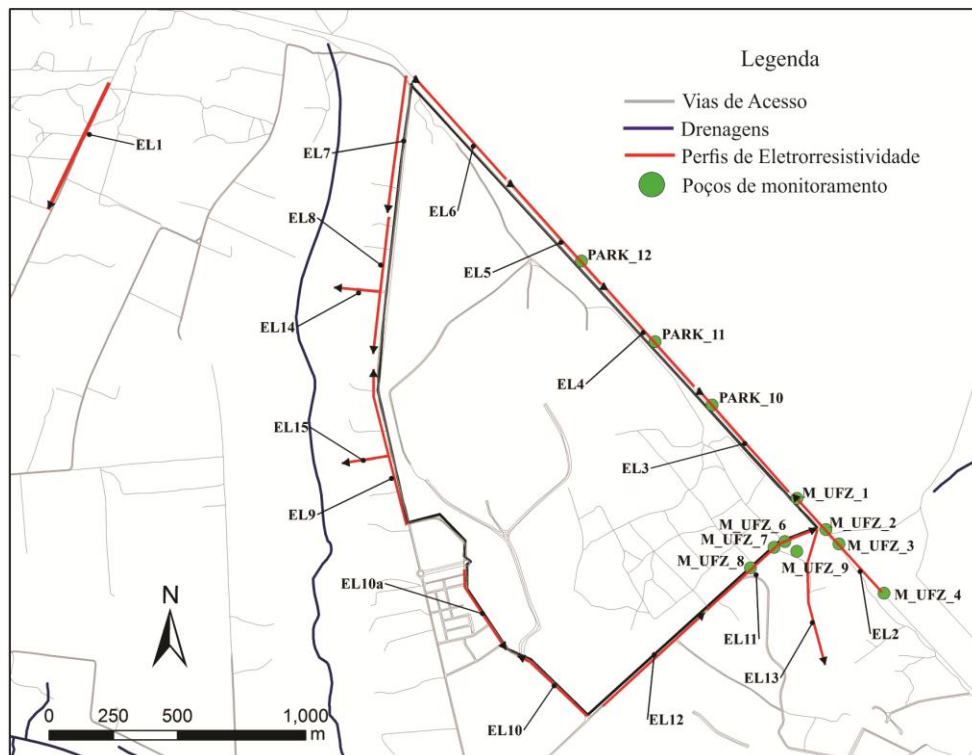


Figura 6. Croqui com a localização dos perfis de eletroresistividade e poços de monitoramento realizados nas proximidades do Aterro JCB.

O equipamento utilizado foi o eletroresistivímetro multieletródico SYSCAL PRO 72 (fabricado pela empresa francesa *IRIS Instruments*), em conjunto de cabos multicanais, com 54 eletrodos de aço inox e 04 conectores de cabos *switch box*, de propriedade do Laboratório de Geociências Aplicada (LGA), do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB). Para a alimentação do eletroresistivímetro foram utilizadas baterias automotivas de 12 volts e 45 Amperes.

A organização, a filtragem e a correção topográfica dos dados de campo foram efetuadas no programa PROSYS II, versão 02.35.01 (*IRIS Instruments*). Posteriormente

exportaram-se os dados para o formato do programa de modelagem inversa RES2DINV, versão 3.4 (*Geotomo Software*).

Aplicou-se a rotina de inversão pelo método do contraste de suavização por mínimos quadrados (Sasaki, 1989), implementada no software. E para otimização dos dados foi utilizado o método de Gauss-Newton, que recalcula as derivadas parciais da matriz jacobiana para todas as iterações.

Com a necessidade de determinar os padrões elétricos para área não contaminada (*background – AN*), realizou-se uma linha de eletroresistividade (EL1) em local distante da influência do aterro JCB, e com as mesmas características geológicas.

RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

A modelagem das seções de eletroresistividade em 2D foi efetuada até a terceira ou quinta iteração entre os valores de resistividade aparentes medidos e calculados, obtendo os valores de 9% a 28% de RMS. Após a terceira e a quinta iteração não houve a diminuição significativa dos erros. Os modelos geoeletricos exibem os valores de resistividade elétrica entre 00 ohm.m a 2560 ohm.m, tendo a média de 670 ohm.m.

Os intervalos de resistividade, nos perfis, receberam a nomenclatura de classificação adotada por Fachin et al (2006); Keller e Frischknecht (1966), onde os resultados foram obtidos em áreas de contaminação comprovada.

Utilizou-se os dos dados de análise de água de 13 poços de monitoramento hidroquímico entre os limites do PNB e do Aterro JCB, que foram realizados por Stollberg *et al.* (2011), através do acordo de cooperação técnico

científica, denominado ÁGUA – DF, firmada com a *Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH* – UFZ e com a Universidade de Dresden

(Alemanha). Os resultados das análises dos poços de monitoramento são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores físico-químicos das análises de água coletadas dos furos de sondagem nas proximidades do aterro JCB, período de estiagem (STOLLBERG *et al.*, 2011).

| Furos de sondagem | Profundidade (m) | N. Freático (m) | pH | Temperatura (°C) | Condutividade (µS/cm) | Amônia (mg/L) |
|-------------------|------------------|-----------------|-----|------------------|-----------------------|---------------|
| M_UFZ_7 | 15 | 8.2 | 5.8 | 24.7 | 994 | 60 |
| M_UFZ_8 | 12 | 7.6 | 6.9 | 24.6 | 647 | 10-30 |
| M_UFZ_6 | 11 | 9.8 | 5.3 | 26.3 | 316 | 20 |
| M_UFZ_9 | 12 | 7.1 | 5.3 | 24.1 | 153.2 | 9 |
| M_UFZ_4 | 10 | 2 | 5.5 | 24.9 | 61.6 | 9 |
| M_UFZ_3 | 10 | 4.5 | 5.3 | 24.7 | 21 | 1 |
| M_UFZ_2 | 12 | 6.7 | 5.7 | 26.7 | 44.6 | 0 |
| M_UFZ_1 | 15 | 6.5 | 5.7 | 26.8 | 65 | 9 |
| Park (10) | 10 | 9.2 | 6.9 | 24.7 | 334 | 2.73 |
| Park (11) | 15 | 9.5 | 6.3 | 25.5 | 130 | 0.15 |
| Park (12) | 10 | 8.7 | 5.6 | 24 | 226 | 0.07 |

A seção **EL1** (*Background*), sem influência de contaminação, foi realizada a uma distância de 1000 metros da área do aterro JCB (Figura 7). Esta seção obteve um erro RMS de 18,6% após três iterações e apresenta três camadas geoeletricas: (a) a primeira camada ocorre desde a superfície até a profundidade média de 10 metros, com resistividade elétrica de 700 a 2000 ohm.m, interpretada como um solo arenoso-argiloso com presença de concreções lateríticas e quartzitos (zona não saturada); (b) a segunda camada possui valores de resistividade elétrica entre 200 e 700 ohm.m, até a profundidade de 30 metros, interpretada como um saprólito com presença de água; e (c) a camada geoeletrica mais profunda mostra valores de resistividade 700 e 2000 ohm.m, interpretada como rochas do Grupo Paranoá (possíveis ardósias – Unidade A).

A seção **EL2** apresenta um erro RMS de 30% com três iterações (Figura 8). Os valores de resistividade elétrica entre 50 e 200 ohm.m coincidem com os locais onde a água subterrânea tem uma condutividade de 44.6 µS/cm, teores de amônia <9 mg/l e valores de pH entre 5.3 e 5.7, o que foi interpretado como uma área levemente contaminada (ALC). Na parte mais rasa da seção os valores de resistividade variam entre 700 e 2000 ohm.m, e são interpretados como um solo/saprólito não saturado. Os valores de resistividade entre 200

a 700 ohm.m, são interpretados como saprólito saturado. Na profundidade entre 30 a 70 metros, os valores de resistividade de 700 a 2000 ohm.m, são interpretados como rochas do Grupo Paranoá (possíveis ardósias – Unidade A).

A Figura 9 mostra a seção **EL11** obtida após a quarta iteração, com erro RMS de 9.1%. Localiza-se entre o limite sudeste do aterro JCB e com o assentamento urbano irregular, ambos próximos ao limite do PNB. No local de realização da seção, existem três furos de sondagem coincidentes com as posições 244, 364 e 413 metros, com profundidade de 12, 15 e 11 metros, respectivamente nomeados como M_UFZ_8, M_UFZ_7 e M_UFZ_6 (STOLLBERG *et al.*, 2011). Os parâmetros da qualidade da água subterrânea indicam valores de condutividade entre 316 a 994 µS/cm, teores de amônia >30 mg/L e pH entre 5.3 a 7.0. Estas concentrações coincidem com os menores valores de resistividade elétrica encontrados na seção (< 50 ohm.m), interpretado como área contaminada (AC). A região contaminada é observada em toda a seção ao longo da profundidade de 20 a 50 metros. Os valores de resistividade elétrica entre 50 a 200 ohm.m foram interpretados como ALC. Entre 200 a 700 ohm.m os valores de resistividade elétrica foram interpretados como saprólito saturado e

acima de 700 ohm.m como embasamento rochoso.

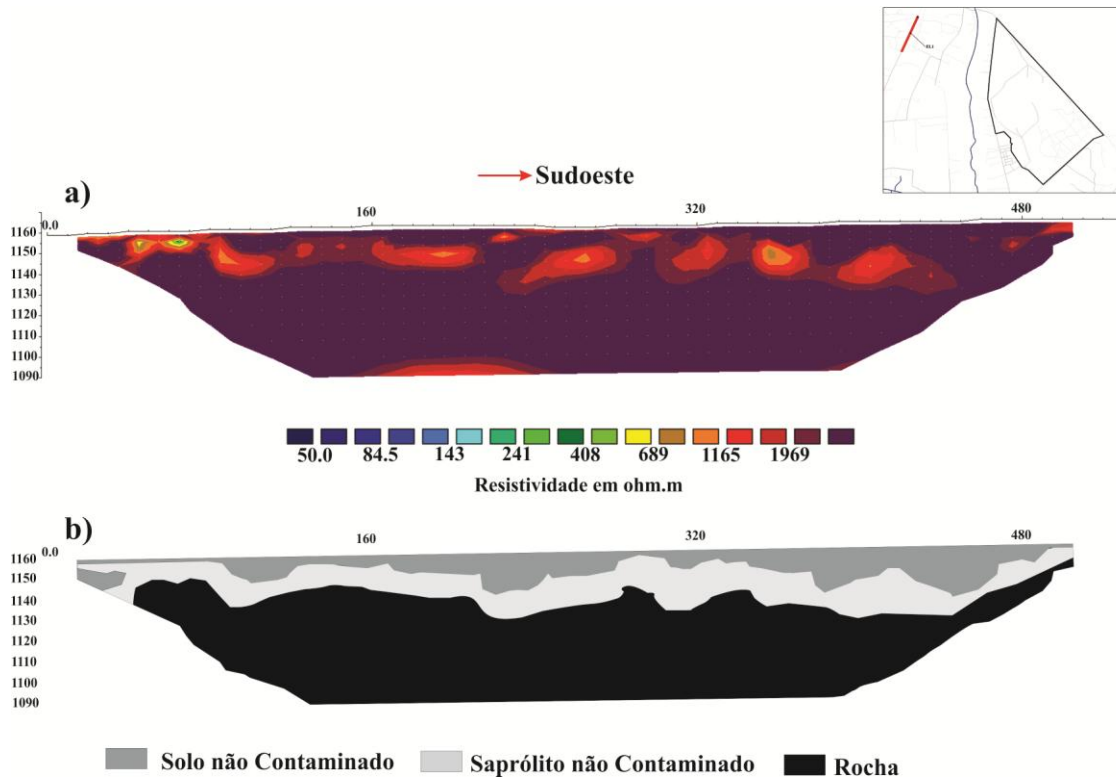


Figura 7. (a) Seção de eletrorresistividade da área não contaminada (*background*) e (b) modelo geológico/geofísico elaborado a partir da correlação entre dados de resistividade elétrica e os dados das análises químicas da água de poços de monitoramento instalados na área do aterro JCB.

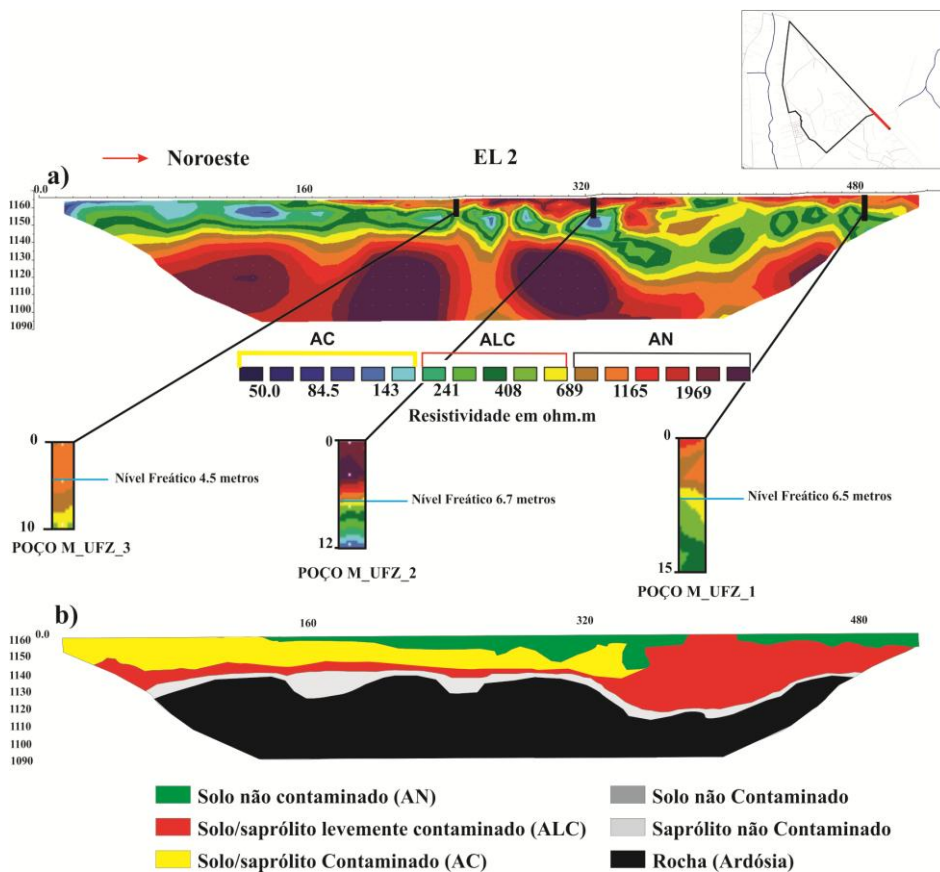


Figura 8. (a) Seção de eletrorresistividade EL 2 (área levemente contaminada – ALC) e (b) modelo geológico/geofísico elaborado a partir da correlação entre dados de resistividade elétrica e os dados das análises químicas da água de poços de monitoramento instalados na área do aterro JCB.

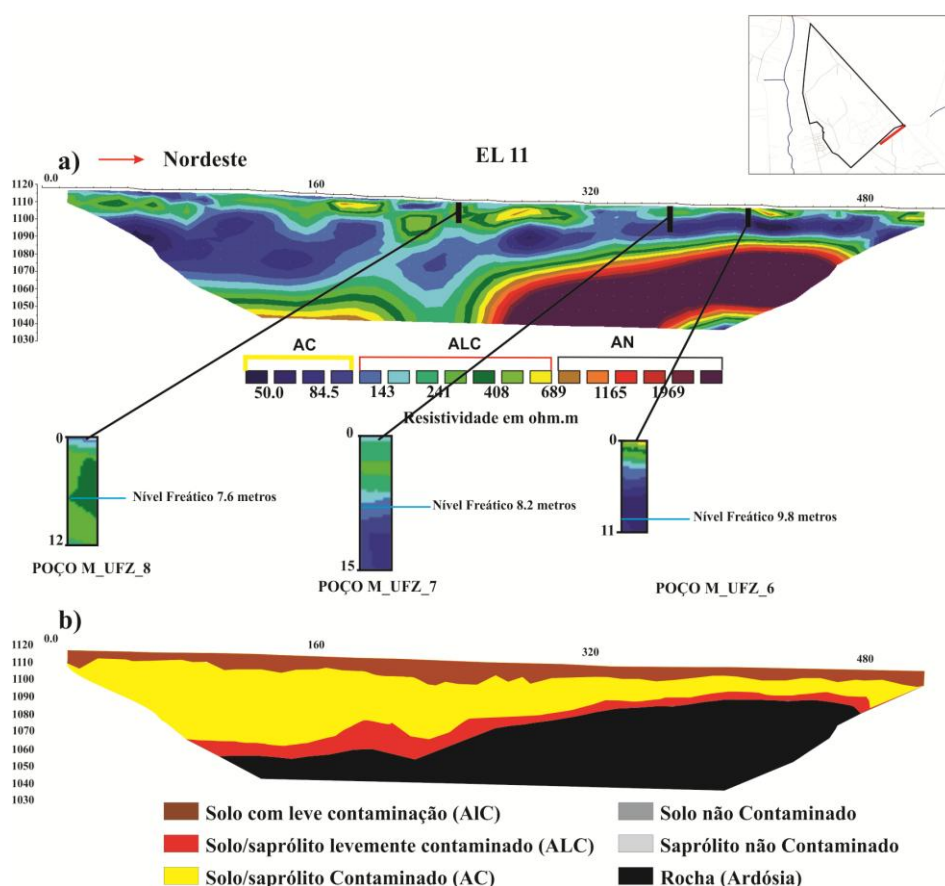


Figura 9. (a) Seção de eletrorresistividade EL 11 (área contaminada – AC) e (b) modelo geológico/geofísico elaborado a partir da correlação entre dados de resistividade elétrica e os dados das análises químicas da água de poços de monitoramento instalados na área do aterro JCB.

As seções de eletrorresistividade que apresentaram valores inferiores de resistividade (<50 ohm.m – AC), estão presentes nas seções EL7, EL8, EL9, EL10, EL10a, EL11 e EL12; localizados nos limites oeste, sudoeste, sul e sudeste do aterro JCB.

As seções de eletrorresistividade que apresentaram os valores de resistividade entre 50 a 200 ohm.m (ALC), estão presentes nas

seções EL4, EL3, EL2; localizados nos limites Nordeste e leste do aterro JCB.

Os valores de resistividade foram comparados aos valores de condutividade, ph e teor de amônia, medidos nos poços próximos as seções de eletrorresistividade. Criando a Tabela 5 que apresenta a relação dos valores de resistividade com os parâmetros físico-químicos da água analisados por STOLLBERG et al. (2011).

Tabela 5. Relação dos valores de resistividade nos limites do Aterro JCB com os parâmetros físico-químicos da análise de água dos poços.

| Área | Resistividade (Ohm.m) | Amônia (mg/L) | NH3 | Condutividade (µS/cm) | pH |
|-----------------------|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|-----------|
| Contaminada | < 50 | >30 | | 375 – 994 | 5.2 – 5.3 |
| Levemente Contaminada | 50 – 200 | 1.0 – 10 | | 160 – 375 | 5.3 – 6.4 |
| Não Contaminada | 200 – 2000 | <1,0 | | <160 | 6.4 – 7.3 |

Os valores de baixa resistividade (AC) estão mais presentes nas regiões sul, sudeste e oeste, preferência da migração da pluma, pelo

fluxo subterrâneo com maior tendência para Córrego Cabeceira do Valo e em direção ao assentamento urbano (Cidade Estrutural).

Com base nas localizações das seções de eletrorresistividade, foi gerado um mapa do posicionamento das áreas contaminadas e com

suspeita de contaminação pelo chorume nos limites do aterro JCB, para o ano de 2012 (Figura 10).

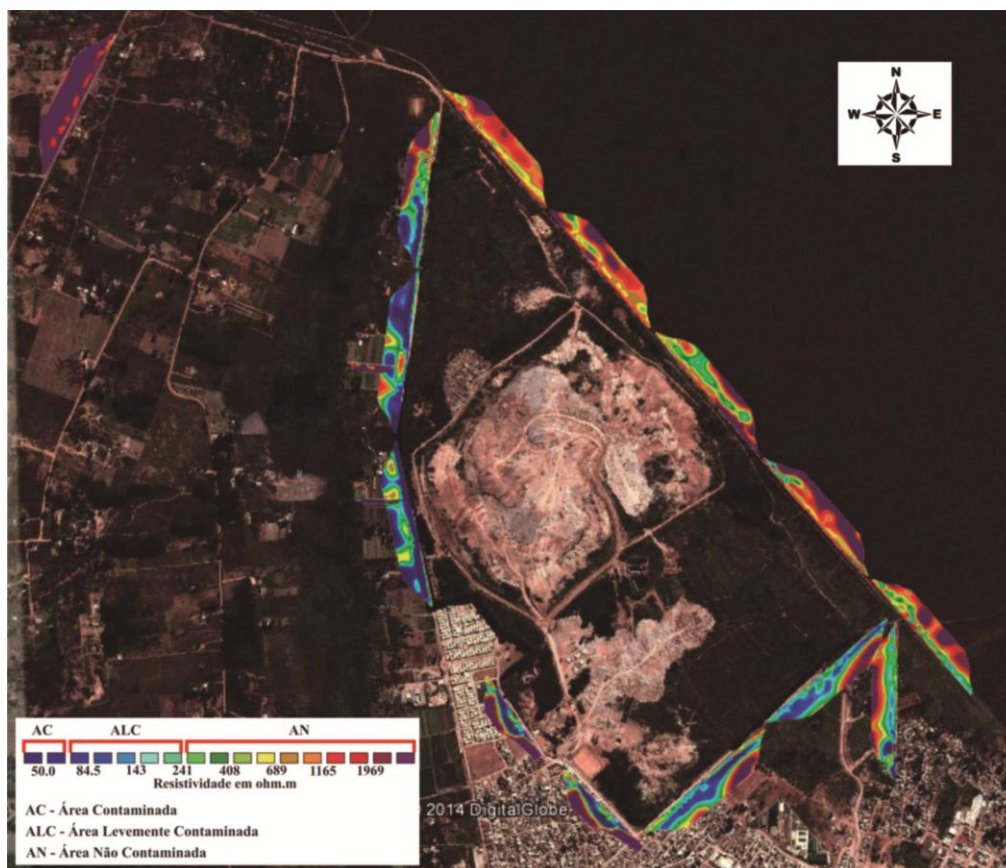


Figura 10. Mapa de localização das áreas contaminadas (AC) e levemente contaminadas (ALC) pelo chorume, nos limites do aterro JCB, para o ano de 2012. Fluxo preferencial da pluma de contaminação para oeste e sudeste da área. Imagem do Google Earth de 02 de outubro de 2012.

CONCLUSÕES

Os modelos geológicos elaborados pelos valores de resistividades apresentaram cinco zonas de resistividade: A primeira, com ocorrência na superfície e valores de resistividade elétrica entre 700 – 2000 ohm.m, interpretada como solo de composição areno-argiloso com concreções lateríticas e com presença de fragmentos de quartzos(saprolito não saturado); a segunda com os valores de resistividades elétrica entre 200 ohm.m a 700 ohm.m, atribuído ao saprolito saturado; a terceira zona com os valores de resistividade elétrica entre 700 ohm.m a 2000 ohm.m, ocorre em maiores profundidades, interpretada como a presença do embasamento rochoso (Ardósia, do grupo Paranoá); A quarta zona, com resistividade elétrica entre 50 ohm.m a 200 ohm.m, relacionada ao saprolito saturado com leve contaminação (ALC) e a quinta zona é

relacionada a área contaminada (AC) com valor de resistividade < 50 ohm.m.

As seções de eletrorresistividade justificaram sua eficiência, podendo investigar o comportamento da pluma de contaminação em solos argilosos com espessa camada. Os resultados permitiram associar os parâmetros de análise de água subterrânea com os valores de resistividade, gerando uma classificação para áreas contaminadas (AC), áreas levemente contaminadas (ALC) e áreas não contaminadas (AN). O método geofísico foi eficiente no delineamento do fluxo subterrâneo, no limites do Aterro JCB, sendo este preferencial para oeste e sudeste com contraste de baixa resistividade para as amostras de água com valores acima de 30 mg/L de amônia.

A ocorrência de valores de baixa resistividade nas áreas mais antigas do Aterro

JCB (sul e sudeste), possa evidenciar a percolação do chorume novo nas valas antigas, tendo estas um comportamento de calhas de escoamento subterrâneo.

Este fluxo é justificável devido o gradiente topográfico da área do aterro ser mais íngreme a oeste (Córrego cabeceira do valo) e levemente inclinado a leste (Córrego do Acampamento). O que evidencia uma contaminação menos

acentuada em direção ao Parque Nacional de Brasília.

É aconselhável o uso de análises físico-químicas de amostras de solo e de água, junto às seções de eletrorresistividade para melhor interpretação e correlação com os parâmetros geofísicos, já que o parâmetro resistividade elétrica é sensível ao grau de umidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Técnico Péricles de Brito Macedo pelo auxílio na aquisição de dados em campo. Ao Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA/UnB) pela disponibilização dos equipamentos geofísicos. Aos membros da PHYGEO, empresa júnior dos alunos de graduação em geofísica da UnB, pelo serviço prestado durante a aquisição de dados.

REFERÊNCIAS

1. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10.004. Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro. 2004.
2. ARAUJO R. DE. **Estudo Geoquímico da Contaminação dos Recursos Hídricos e sua Propagação nas Adjacências do Aterro de Resíduos Sólidos Jockey Club – DF.** 1996. Instituto de Geociências (Dissertação de Mestrado), IG/UNB, Brasília/DF, 74pp.
3. BRAGA. ACO. Apostila didática: **Métodos geoeletricos aplicados: módulo: Hidrogeologia.** Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, 1999. 91 p.
4. CAMPOS, J. E. G. e FREITAS-SILVA, F. H. **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal.** 1998. Relatório Técnico, Vol. 4 – Hidrogeologia do Distrito Federal SRH/MMA – IEMA/SEMATEC, Brasília, DF. 85p. 1998.
5. CAMPOS JEG, SANTOS LM & SEIDEL AM. 2006. **Estudos geotécnicos preliminares e caracterização dos limites da área do antigo aterro na região da Vila Estrutural – DF.** Água e Terra Consultoria e Planejamento Ambiental. Relatório Técnico. 70 p.
6. CAMPOS JEG. 2007. **Análise e delimitação da pluma de contaminação do Aterro do Jockey, região da Vila Estrutural.** Relatório Técnico, Brasília/DF, 14pp.
7. CARTWRIGHT, K. e McCOMAS, M.R. Geophysical surveys in the vicinity of sanitary landfills in northcentral Illinois. **Ground Water.** Ohio-USA. 1968. v. 6, n 5, p 23-30.
8. CETESB, Manual de Gerenciamento de áreas contaminadas/ CETESB, GTZ. 2 ed. São Paulo. 2001. 389p.
9. CHAMBERS, J.; OGILVY, R.; MELDRUM, P.; NISSEN, J. 3D Resistivity imaging of buried Oil and Tar contaminated waste deposits. *European journal Of Environmental Geophysics*, 4 3-15. 1999.
10. ELIS, V. R. **Avaliação da Aplicabilidade de Métodos Elétricos de Prospecção Geofísica no Estudo de Áreas utilizadas para Disposição de Resíduos.** 1999. Dissertação de Doutorado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, São Paulo. Brasil
11. FACHIN SJS, HUBER F, SHIRAIWA S, BORGES WR & MIGLIORINI RB. Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtime. *Revista Brasileira de Geofísica*, 2006. 24(1): 129-138.
12. FARQUHAR, G.J. Leachate: production and characterization. 1989. *Canadian Journal of Civil Engineering.* Nº16, p. 317 – 325.
13. FRANCO HA. **Geofísica e Químicas Aquáticas Aplicadas ao Estudo da Contaminação de Recursos Hídricos Subterrâneos no Aterro do Jockey Club, Brasília.** 1996. Instituto de Geociências (Dissertação de Mestrado), IG/UNB, BRASÍLIA/DF, 95PP.
14. GALLAS JDF. 2000. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, SP.
15. GALLAS JDF, TAIOLI F & SILVA SMCP. 2005. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica (ISSN 0102-261X).* 23(1): 51-59. www.scielo.br/rbg.
16. GEOTOMO. 2003. RES2DINV Version 3.53. for Windows 98/ME/2000/NT/XP. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. User's Manual, 129p.
17. HALLOF PG. **On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements:** Cambridge, 1957. MIT, Ph. D. thesis.
18. KELLY, W.E. Geoelectric Sounding for Delineating Ground-Water Contamination. 1976. *GroundWater.* v. 14, n.1, p 6-10.
19. KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração.** Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina do Texto, 2009. 438p.
20. KELLER GV e FRISCHKNECHT FC. 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting.* Pergamon Press Inc., Oxford.
21. KOIDE, S.; BERNARDES, R.S. Contaminação do Lençol Freático sob a área do Jockey Club, Distrito Federal. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 11p. 1998.
22. LOKE MH e DAHLIN T. 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 49(3): 149-162.
23. McNEIL, J.D. *Electrical Conductivity of Soils and Rocks,* Technical note TN-5. GEONICS LIMITED. Mississauga. Canadá. 1980. 20p.
24. MEJU, MA. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics* 44 (2000) 115-150. 2000.

25. MENDES, JMB. **Técnica geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas.** 1987. Tese Doutorado em Geociências. Universidade de São Paulo (USP). 196p.
26. MOURA, HP e MALAGUTTI FILHO, W. Método de eletrorresistividade e de polarização induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro – SP. São Paulo, UNESP, **Geociências**, 2003. V.22, N. Especial, pag. 129-139.
27. MOREIRA, C.A. **Geofísica aplicada no monitoramento de área de disposição de resíduos sólidos domiciliares.** 2009. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro-SP. 167p.
28. OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. Geologia de engenharia. ABGE, 586 p. 1998.
29. ORELLANA, E. 1972. Prospeccion geoelectrica em corriente continua. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips. 523p
30. PEREIRA, J. H. F., PASTORE, E. L., BERNARDES, R. S. SOUZA, N. M. e CARVALHO, J. C. **Estudos Geológico-Geotécnicos para o Planejamento e Projeto de Disposição de Resíduos Urbanos do Aterro de Lixo do Jóquei.** Relatório Final, Vol. 4, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 1997. 86p.
31. REYNOLDS JM. An introduction to applied and environmental geophysics. Ed. John Wiley and Sons. 1997. 796 p.
32. SANTANA, O.A.; IMAÑA – ENCINAS, J.M. Modelo espacial de contaminação do solo e do lençol freático do Aterro do Jockey Club para o Parque Nacional de Brasília, Brasília-DF. Cartografia Geotécnica e Geoambiental (Conhecimento do Meio Físico) ISBN:85-984506-06-X. 2004.
33. SANTOS, P.C.V. **Estudos da Contaminação de Água Subterrânea por Percolado de Aterro de Resíduos Sólidos – Caso Jockey Club-Df.** 1996. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF.1996.
34. SASAKI Y. 1989. Two-dimensionas joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. **Geophysics**, Vol. 54(2):254-254.
35. SHIRAIWA, S; LISOVSKY, S.P; ELIS, V.R; PORSANI,J.L; BORGES, W.R. Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil: resultados preliminares, Revista Brasileira de Geofísica, 2002. V.20, n.3, PL 181-186.
36. STOLLAR RL & ROUX P. 1975. Earth resistivity surveys – A Method for delineating groundwater contamination. **Ground Water**, 13:145-150.
37. STOLLBERG, R., WEIB, H. **Municipal waste disposal Lixão do Jóquei, Brasília, Distrito Federal do Brasil: Site investigation, groundwater monitoring, and hydrochemical analysis.** 2011. Status Report I. Project: IWAS – ÁguasDF, Sub-project 3 “Hydrological cycle”. HELMOLTZ (Centre for Environmental Research – UFZ). 38p.
38. TELFORD, W.M; GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. Applied geophysics. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1990, 770p.
39. TCHOBANOGLIOUS, G. THEISEN, H. & VIGIL, S. A. **Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues.** McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. Macgraw Hill, Book Co., Inc., New York, 1993. 979 pag.
40. URISH, D.W. The Practical Application of Surface Electrical Resistivity Detection of Ground-water Pollution. **Ground Water**. 1983. v. 21, n 2, p 144-152.
41. VELOZO, R. **Caracterização geológica-geotécnica do lixão desativado de São Carlos, com auxílio da geofísica.** 2006. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. 139p.
42. VOGELSANG D. Environmental geophysics – A practical guide. Springer-Verlag, New York, 1995. 173 p.

*Manuscrito recebido em: 10 de Janeiro de 2014
Revisado e Aceito em: 09 de Junho de 2014*