

A geofísica no estudo da poluição da água subterrânea

Nelson Ellert¹
John Greenhouse²
Mark Monier-Williams³

RESUMO Durante décadas, métodos geofísicos têm sido utilizados na prospecção de petróleo, depósitos minerais e também de água subterrânea. Recentemente, encontram aplicação no estudo de poluição de água subterrânea associada a depósitos de rejeitos urbanos e industriais. Nestes, os métodos eletromagnéticos indutivos, eletrorresistividade, magnetometria têm a sua maior aplicação, complementados pela sísmica de refração e sísmica de reflexão rasa. Recentemente foi incorporado o método do radar de penetração do solo como mais uma ferramenta de grande importância. Estão aqui relatados dois exemplos de investigação realizada no Estado de São Paulo. A finalidade principal da aplicação de métodos geofísicos é obter informações para orientar uma subsequente campanha de perfurações e amostragem, onde se reduzem os riscos físicos e financeiros geralmente inerentes à investigação de contaminantes. **Palavras-chave:** geofísica aplicada, poluição de água subterrânea, mapeamento, monitoramento.

ABSTRACT Geophysical principles which have long been applied for oil, mineral and groundwater exploration are now being applied to groundwater contaminant studies. The main methods for detection of contaminant sources and migration paths include EM induction, resistivity, ground penetrating radar and magnetics. Addition supplementary methods are applicable for high trends of inorganic contaminants emanating from landfills or spill sites. The primary tasks of these geophysical surveys are to provide targets for subsequent drilling and sampling programs, and to reduce financial and physical risks inherent in contaminant investigations. A brief discussion of the methods and two case histories under Brazilian field conditions are presented. **Key words:** geophysical techniques, groundwater pollution, mapping, monitoring.

INTRODUÇÃO

Métodos geofísicos de prospecção têm sido utilizados desde há muito tempo na prospecção de água subterrânea, no intuito de determinar os locais mais favoráveis à perfuração de poços. Recentemente, em decorrência da ocupação irracional do meio ambiente, surgiram problemas quanto à qualidade da água subterrânea. Se inicialmente o enfoque era a quantidade de água, hoje grande atenção tem sido dada à sua qualidade. Pesquisadores como Greenhouse, Slaine e outros começaram a utilizar métodos geofísicos em estudos de poluição de água subterrânea por depósitos de rejeitos industriais e aterros sanitários. Mais recentemente começaram a ser utilizadas, aqui no Brasil, também técnicas geofísicas no estudo de poluição da água subterrânea. Neste trabalho deseja-se apresentar algumas técnicas geofísicas que são ou que podem ser utilizadas no estudo de poluição de águas subterrâneas.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os objetivos de qualquer levantamento geofísico podem ser resumidos em:

a) definir a estrutura geológica local (espessuras e

¹ Geólogo, Doutor em Ciências pela USP, Professor do Instituto de Geociências da USP e Vice-Diretor do Cepas - Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas.

² Físico, Doutor em Geofísica pela Universidade da Califórnia, chefe do Earth Science Department da Universidade de Waterloo, Canadá.

³ Geólogo, Mestre em Ciências da Universidade de Waterloo, Canadá.

profundidades de camadas geológicas ou variações de facies dentro delas);

b) mapear a extensão da área poluída e, se possível, indicar a intensidade da poluição, bem como a sua evolução no tempo (monitoramento).

Como a perfeita identificação da extensão e intensidade da poluição depende da construção de uma rede de poços de amostragem (piezômetros ou poços de monitoramento), é de grande importância a execução de levantamentos geofísicos antes de sua construção. Desta forma definem-se os pontos representativos do processo poluente e a estrutura geológica do sítio, objeto de estudo.

É assim que alguns métodos são aplicados na definição das estruturas e, outros, na identificação direta da presença de zonas anômalas.

Como os agentes poluentes podem ter condutividades mais elevadas que a água subterrânea, estes agentes, ao migrarem através das camadas geológicas, podem ter porções retidas na zona insaturada, bem como atingir o lençol freático. Com isto alteram substancialmente a condutividade, possibilitando a sua detecção quer no mapeamento quer no monitoramento, quando é determinada a evolução do quadro no tempo, em termos de extensão e/ou intensidade.

MÉTODOS GEOFÍSICOS

Eletrorresistividade

Aplicando-se uma tensão elétrica a um meio qualquer, haverá um fluxo de corrente neste meio, cuja intensidade dependerá fundamentalmente da sua condutividade (ou resistividade). Se considerarmos o meio como sendo uma camada geológica, composta de areias, argilas e cascalhos, ele apresentaria uma condutividade baixa, consequência do fato de os minerais que o constituem serem praticamente isolantes.

Verifica-se que em muitos casos a condutividade é bastante elevada como consequência da presença de soluções condutoras que saturaram os poros da matriz isolante. A condutividade será tanto maior quanto maior a quantidade de solução presente e a sua capacidade condutora em função do teor em sais, ácidos ou bases nela presentes.

Depósitos de rejeitos urbanos e industriais, ou a intensa aplicação de compostos para fins agrícolas (insusos, ferti-irrigação etc.), com elevados teores de Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} , $\text{P}_2\text{O}_5^{--}$, NO_2^- , NO_3^{--} , K^+ etc., fazem com que a água de chuva percolada, carregada destes elementos condutores em seu caminho rumo ao lençol freático, altere fundamentalmente a condutividade das zonas insaturada e saturada. O fluxo subterrâneo, apesar de lento, dispersa estes contaminantes em seu trajeto.

Portanto, para se identificar a presença de zonas contaminadas e se definir a extensão (lateral) e penetração (profundidade), emprega-se o método da eletrorresistividade respectivamente em seus procedimentos de caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical, os quais são descritos a seguir.

Caminhamento elétrico

Emprega-se um arranjo de quatro eletrodos (Figura 1) AMNB que são enterrados na superfície do solo. Aos eletrodos A e B aplica-se uma tensão (até 1 000 V dependendo da fonte) e através de M e N mede-se a diferença de potencial (ΔV) criada. Ao aplicar-se a tensão em A e B, aparece um fluxo de corrente de intensidade I, que depende, entre outros fatores, da resistividade do meio. Medindo-se a corrente I e a diferença de potencial ΔV , e conhecendo-se as distâncias entre os eletrodos ($r_1 = \text{AM}$, $r_2 = \text{AN}$, $r_3 = \text{BM}$ e $r_4 = \text{BN}$), determina-se a resistividade do meio:

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

$$\text{onde } K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}}$$

Uma vez determinado o valor de δ em um dado ponto, desloca-se o arranjo ao ponto seguinte, distante 10 m ou 20 m, e faz-se uma nova determinação e, assim, sucessivamente até que todo o perfil seja coberto.

Mantendo-se fixa a distância entre os eletrodos A e B, investiga-se até uma profundidade, a grosso modo, constante. Esta profundidade depende do espaçamento AB e é, aproximadamente, $\text{AB}/3$.

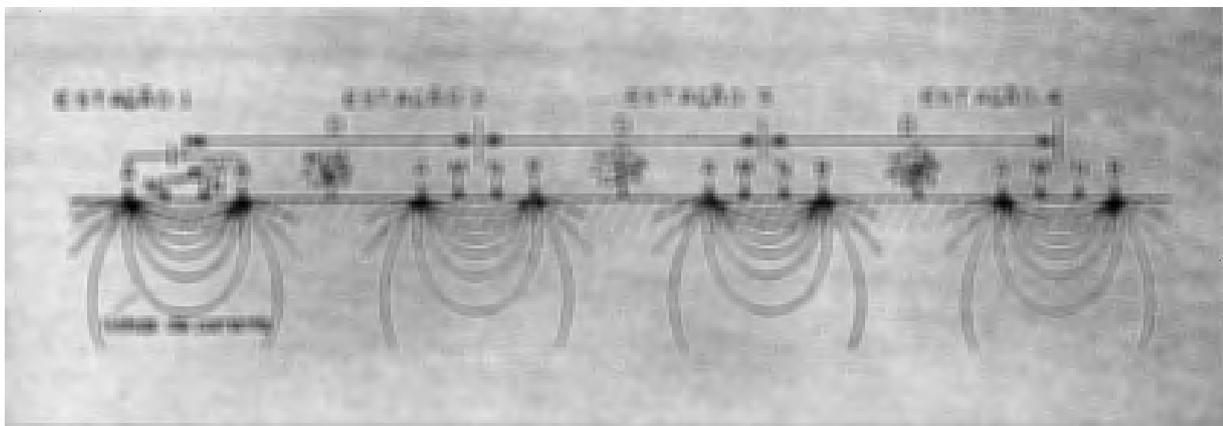


Figura 1 - Caminhamento elétrico. Disposição dos eletrodos no solo. A e B eletrodos de corrente (determinação da corrente I em mA), M e N eletrodos de potencial (determinação da diferença de potencial DV em mV). Arranjo dos eletrodos Wenner.

MAGNETOMETRIA

Cobrindo-se a área objeto de investigação com perfis e pontos de medida, mapeia-se assim a sua condutividade (ou resistividade), que irá refletir a localização e extensão da nuvem poluente subterrânea.

Se o equipamento fonte de tensão for de corrente contínua, de modo a facilitar os trabalhos de campo, deverão ser utilizados, em M e N, eletrodos não-polarizáveis do tipo Cu/CuSO₄. Se porém for corrente alternada, poderão ser utilizados eletrodos metálicos.

Sondagem elétrica

Neste procedimento, os eletrodos de corrente, iniciando com um pequeno espaçamento, são gradativamente afastados, de modo a possibilitar a obtenção de informações de estratos gradativamente mais profundos. Sua finalidade é, portanto, investigar o comportamento vertical dos estratos geoeletricos e determinar as suas espessuras e profundidades.

Considerando que as soluções saturantes são as que conferem os maiores contrastes e podem tanto ter diferentes miscibilidades com a água subterrânea como serem adsorvidas na zona insaturada, é possível assim identificar se se encontram ou retidas na zona insaturada ou flutuando na superfície do lençol freático ou, ainda, misturadas dentro de toda a coluna de água.

A resolução do método repousa exclusivamente nos contrastes de condutividade que a presença de soluções condutoras, ou mesmo isolantes, conferem aos diferentes estratos.

Deve-se esclarecer que, como qualquer outro método geofísico, também este requer um certo compromisso entre os fatores geométricos – espessura – e elétricos – resistividades das camadas. Caso estes compromissos mínimos não sejam atendidos, surgirá o efeito da supressão, que é a não percepção, a partir de dados obtidos na superfície, da presença de um estrato em profundidade. Por exemplo, se sua espessura for muito delgada, com pequenos contrastes de condutividade situados a grande profundidade, a influência que eles exercem no comportamento das linhas de corrente é tão pequena que cai dentro dos limites de medida dos equipamentos utilizados no campo.

Uma das diversas formas de dispor rejeitos, sobretudo industriais, é, muitas vezes, acondicioná-los em receptáculos metálicos – como tambores, por exemplo –, dispô-los em trincheiras ou valas e, posteriormente, recobri-los com solo. Eles podem conter produtos tóxicos, explosivos, inflamáveis etc. Frequentemente o exato local onde se encontram não é determinado e, assim, se se tornar necessária sua remoção, ou localização, devem ser executados levantamentos de campo. A exemplo de qualquer corpo colocado sob a influência do campo magnético terrestre, e em função de sua suscetibilidade magnética, os tambores terão um magnetismo induzido. Este, somado ao terrestre, altera este último de forma detectável, em um dado ponto, e essa alteração é perceptível através de medidas feitas com a utilização de um magnetômetro.

Gilkeson, R.H., Heigold, P.C., Laymon, D.E., em *Ground Water Monitoring Review vol.6, nº 1 – 1986*, apresentam os resultados obtidos através de levantamentos semelhantes. Nestes, a aplicação de outros métodos não forneceu elementos necessários para a determinação das trincheiras onde estariam localizados os tambores metálicos contendo rejeitos industriais pois, mesmo tendo sofrido corrosão, esta em geral não é completa. Esse fato, aliado à proximidade dos tambores da superfície do solo, causa anomalias que, embora pequenas, possibilitam identificar sua presença.

MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

A passagem de uma corrente elétrica alternada através de uma bobina cria ao seu redor um campo eletromagnético alternado indutivo. Se no raio de ação deste campo se encontrarem corpos condutores, neles aparecerão induzidas correntes secundárias alternadas que, por sua vez, criam um campo eletromagnético secundário. Uma bobina receptora estacionada onde o campo primário e o secundário exercem sua influência terá nela induzidas correntes que resultam da soma destes dois campos.

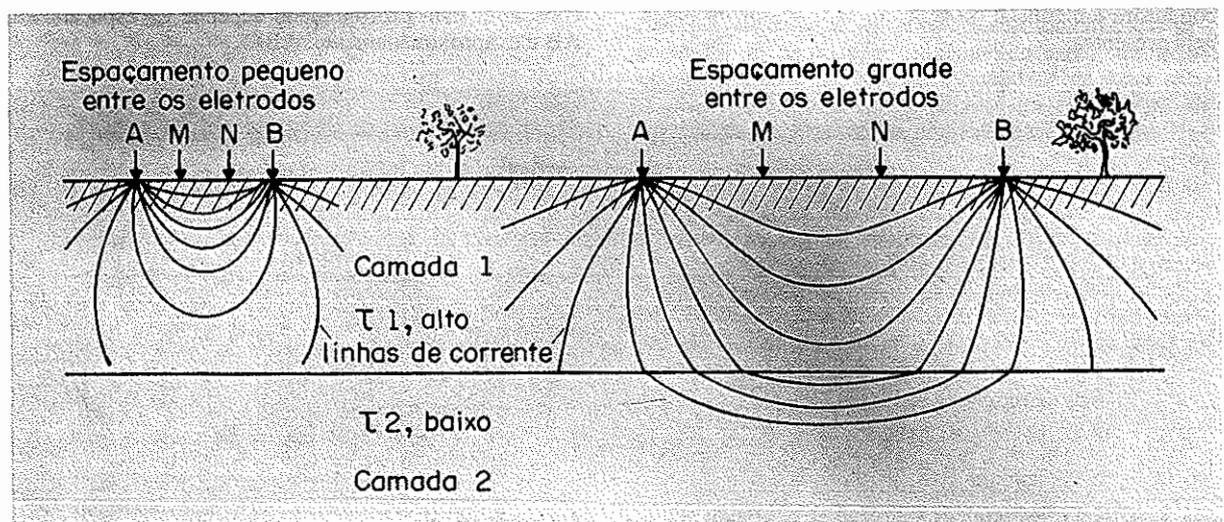


Figura 2 – Sondagem elétrica. Disposição dos eletrodos no solo. Comportamento das linhas de corrente quando a segunda camada é mais condutora do que a primeira.

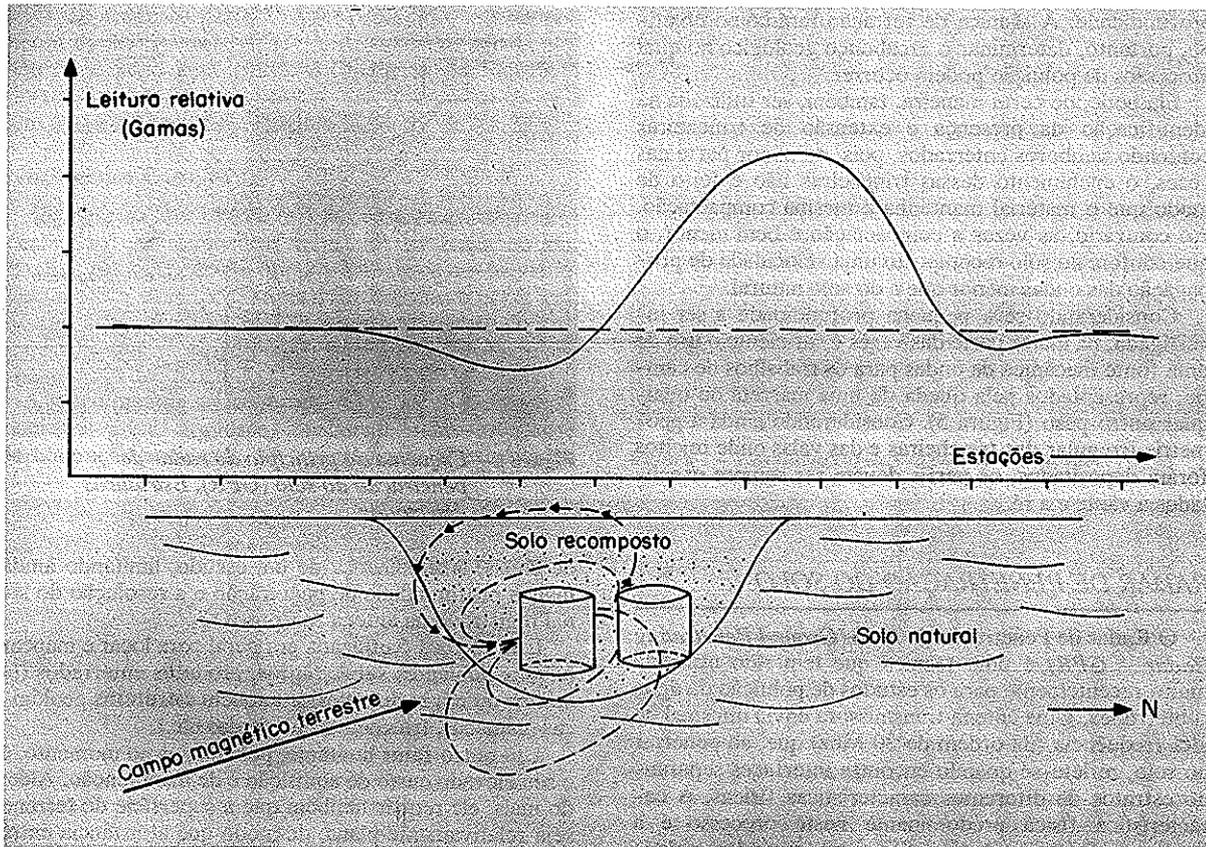


Figura 3 - Perfil magnético obtido numa seção transversal à concentração de tambores metálicos enterrados.

Equipamentos hoje existentes no mercado (EM 31 e 34 - GEONICS) são construídos de forma que a corrente induzida na bobina receptora é proporcional à condutividade do solo. A penetração dos campos depende, entre outros fatores, da distância entre as bobinas e da posição do seu eixo. Se vertical, a profundidade de investigação atinge o dobro do que seria obtido com as bobinas com eixo horizontal (Figura 4).

Atualmente os métodos eletromagnéticos indutivos são os mais aplicados na investigação de zonas contaminadas, face à rapidez de execução dos trabalhos e da reduzida equipe (máximo de dois) necessária. A rapidez se dá pelo fato de não ser necessário fazer contato da fonte de corrente com o solo por meio de eletrodos, e porque a intensidade do campo gerado não depende do bom aterramento de eletrodos.

SÍSMICA DE REFRAÇÃO

A sísmica de refração baseia-se no fato de que estratos geológicos com diferentes propriedades elásticas apresentam diferentes velocidades de propagação de ondas acústicas. Sua aplicação para fins de estudo da poluição está, assim, relacionada diretamente com a determinação dos estratos, em termos de espessuras, profundidades, extensão, mais do que diretamente com a determinação da presença e extensão de uma nuvem poluente.

Como os estratos geológicos podem ter diferentes permeabilidades, haverá maior ou menor facilidade para os agentes poluentes migrarem lateralmente ou em

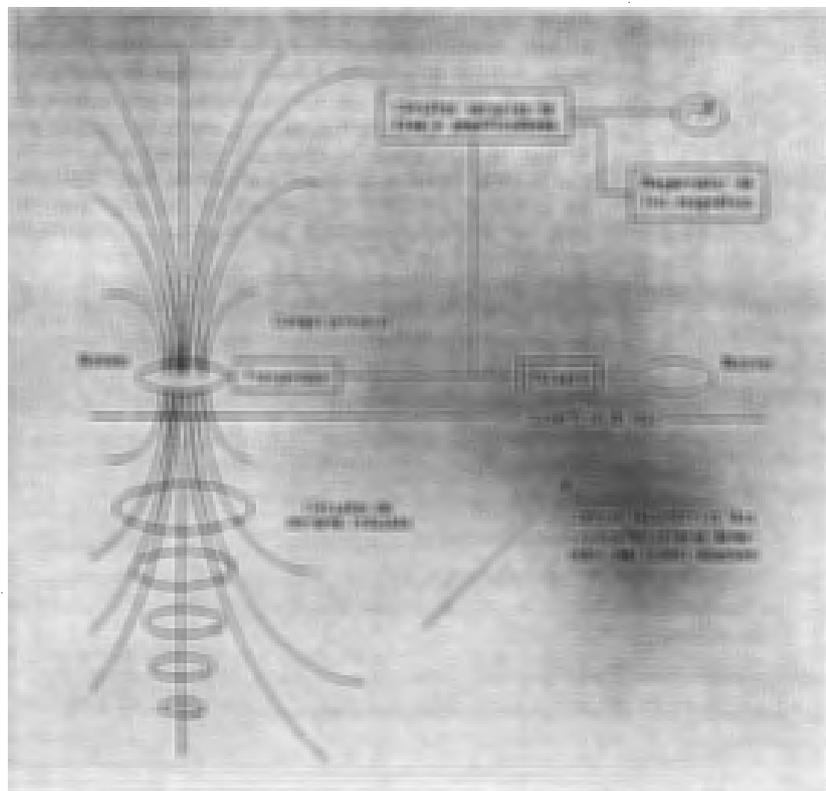


Figura 4 - Esquema do princípio eletromagnético indutivo (segundo Benson, R.C. et al.).

profundidade. A sísmica de refração terá como objetivo, portanto, determinar o arcabouço geológico no qual processos de poluição podem ocorrer.

Ela pode, de certa maneira, também, ser utilizada na identificação da presença e extensão de trincheiras contendo tambores enterrados, pois, na maior parte das vezes, o enchimento dessas trincheiras não é feito de modo que o material mantenha a mesma compactação. Ao contrário, às vezes a compactação é bem menor, o que confere ao solo recomposto uma velocidade de propagação das ondas menor que a do solo natural.

Considerando-se a pequena profundidade a ser investigada, na maior parte das vezes é suficiente o uso de uma fonte mecânica de ondas para os trabalhos de campo, representados pela queda de uma marreta ou qualquer outro peso (Figura 5). Considerando ainda a geometria irregular das trincheiras e das valas onde rejeitos foram depositados, os perfis devem ser sempre executados a vante e a ré.

RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO

O Radar de Penetração do Solo (*Ground Penetrating Radar - GPR*) é uma técnica que tem sido utilizada muito recentemente para os estudos de poluição de água subterrânea. Uma antena transmissora envia um sinal de alta frequência (da ordem de 30 Mhz) que, ao penetrar no solo, reflete-se quando encontra interfaces separando estratos de diferentes características físicas. A característica física predominante neste processo é a constante dielétrica. Assim, diferentes graus de umidade ou condutividade das camadas, que afetam de maneira complexa a constante dielétrica, podem ser detectados numa antena receptora cujo sinal, após tratamento, é registrado em fita magnética e de forma a fornecer uma seção vertical do solo em termos de tempo de percurso.

Se de um lado o método é limitado em termos de profundidade de penetração, por outro ele ganha em termos da velocidade na obtenção de dados e na resolução lateral. Merece destaque um grande fator limitante na aplicação do GPR: a presença de camadas superficiais de alta condutividade que impedem a penetração

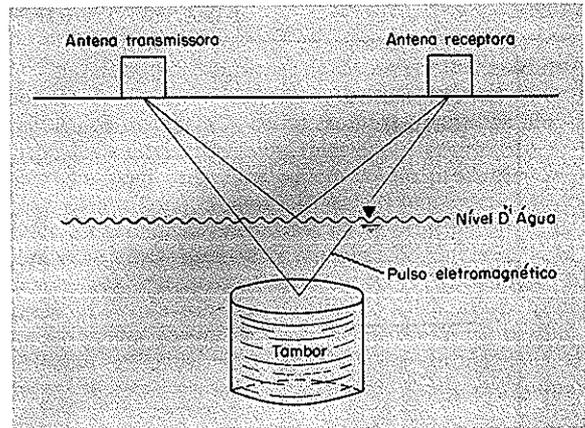


Figura 6 - Esquema do princípio do radar de penetração do solo (GPR). Estruturas detectadas.

de sinais, à semelhança de um escudo, limitando ainda mais a profundidade de penetração e a resolução do sinal registrado na antena receptora.

Esta técnica é utilizada em geral para local e mapear nuvens poluentes subterrâneas, produtos enterrados (*in natura* ou em recipientes) e também estruturas geológicas (camadas, trincheiras enterradas etc.).

Um outro fator limitante, pelo menos no momento, é o seu elevado custo de aquisição e de manutenção. Além do mais, ele requer também que a superfície do terreno seja relativamente plana, de modo que a distância entre o solo e as antenas se mantenha constante e uniforme, reduzindo assim o ruído e a probabilidade de erros.

EXEMPLOS: ATERROS SANITÁRIOS

Santo André

Localizado na extremidade E da cidade de Santo André, SP, acha-se instalado sobre rochas de embasamento cristalino alterado, constituído essencialmente de xistos com veios de quartzo (Figura 7). Os rejeitos, principalmente os de origem domiciliar, sofrem uma seleção parcial, pois a parte orgânica é destinada a uma usina de compostagem situada nas proximidades e o restante do material é encaminhado para um depósito.

Mesmo sendo a maior parte da matéria orgânica retida na usina de compostagem, o produto final possibilita ainda a geração de grande quantidade de chorume, com elevados teores de mineralização e de matéria orgânica saindo do depósito. Este escoar para o riacho aí localizado (E), onde existe uma grande quantidade de casas recém-construídas. A Figura 8 mostra a extensão da zona condutora para a área urbanizada.

Por ocasião dos levantamentos de campo, as casas aí assinaladas encontravam-se em fase de construção. Foi possível observar que grande parte delas tinha suas fundações apoiadas sobre parte do lixo acumulado, o qual continha grande quantidade de papel, plástico etc. As linhas de condutividade mostram a extensão, bem como a continuidade das áreas de elevada condutividade. E mesmo que a área se encontre recoberta por solo, isto não impede a geração do metano e de outros gases, o que, de certa forma, representa um grande perigo para a saúde e segurança da população que aí se instalou.

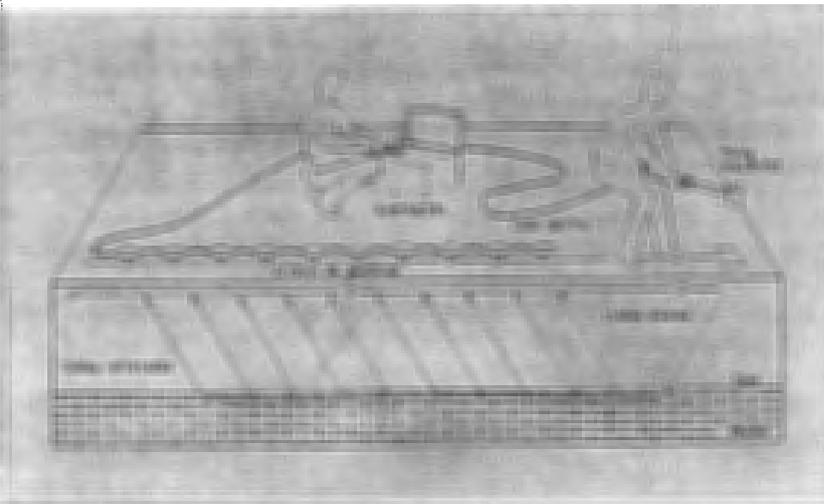


Figura 5 - Disposição no campo de um sismógrafo de dez canais, mostrando os caminhos das ondas diretas e refratadas. Fonte mecânica de ondas (segundo Benson, R.C. et al.).

O mapeamento nesta área foi precedido de levantamento de eletrorresistividade, utilizando caminhamento elétrico e sondagem elétrica. Os dados da Figura 8 mostram os resultados obtidos, onde contrastes da ordem de 16 dB foram detectados.

São José dos Campos

Este aterro, que recebe rejeitos urbanos e industriais, localiza-se em sedimentos terciários da bacia do rio Paraíba. Encontra-se em um dos flancos de um pequeno vale, onde a drenagem superficial do aterro corre em direção a um alagado. Este, por sua vez, é cortado por um riacho que se dirige para o rio Paraíba. O aterro situa-se cerca de 15 m a 20 m acima do nível do alagado.

Os sedimentos encontrados neste local são essencialmente areno-argilosos, localmente muito arenosos, de coloração variegada. O levantamento aí executado,



Figura 7 - Localização das áreas investigadas.

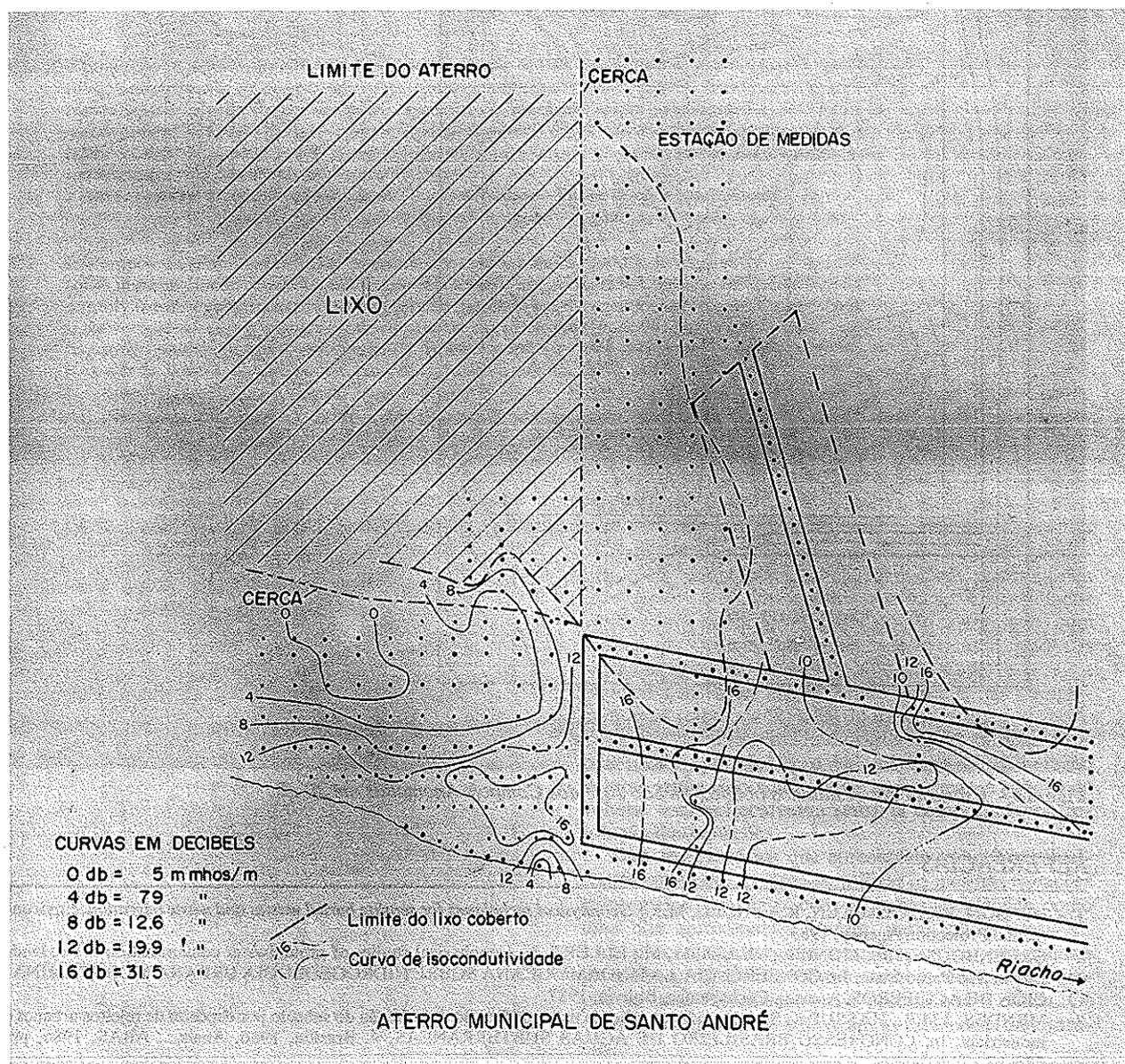


Figura 8 - Esquema dos resultados obtidos em Santo André. A área urbanizada na parte E-SE corresponde às ruas onde se encontram anomalias até 16 dB.

precedido por levantamento de eletrorresistividade, teve por objetivo comparar os resultados obtidos por eletrorresistividade com aqueles obtidos por levantamento eletromagnético indutivo, bem como definir locais onde piezômetros representativos deveriam ser instalados. Este último objetivo se baseou no fato de que piezômetros aí instalados, antes da realização do levantamento geofísico, mostraram-se ineficientes, sobretudo porque,

como depois foi observado pelo levantamento geofísico, estavam mal colocados, ou seja, encontravam-se fora da área da nuvem poluente.

A Figura 9 mostra os resultados obtidos com o equipamento EM 31, cujos valores de alta condutividade, encontrados mesmo fora da área do alagado, indicam que devem relacionar-se com a presença de poluentes advindos do depósito de lixo.

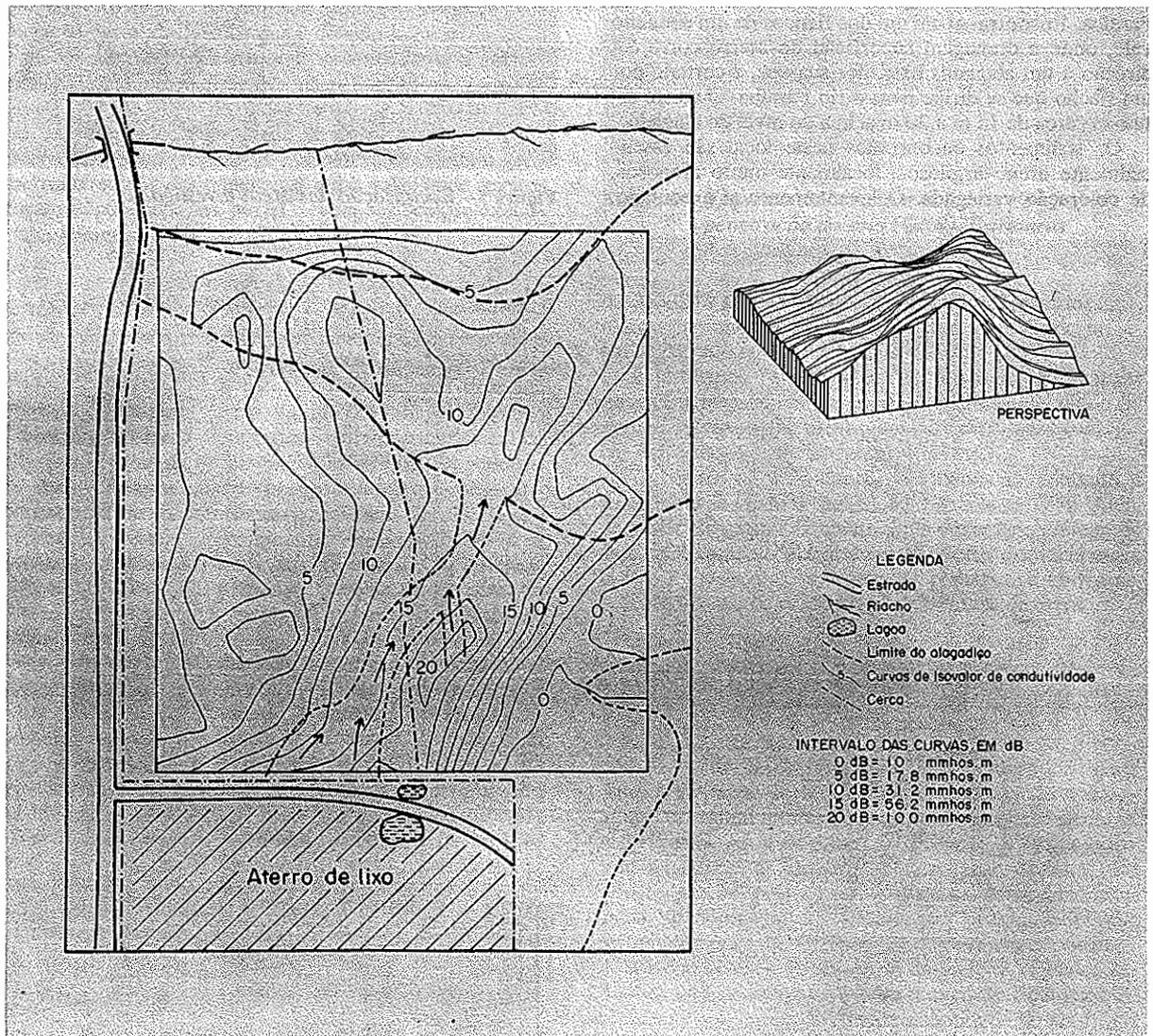


Figura 9 - Esquema dos resultados obtidos em São José dos Campos. Anomalias até 20 dB.

REFERÊNCIAS

- 1 - BENSON, R.C.; GLACCUN, R.A.; NOEL, M.R.; *Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration*. Environmental Protection Agency, 1983.
- 2 - GREENHOUSE, J.P.; MONIER-WILLIAMS, M.; ELLERT, N. Geophysical studies of groundwater contamination at two landfills in São Paulo State. In: CONFERÊNCIA LATINOAMERICANA SOBRE HIDROGEOLOGIA URBANA Y CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS. Anais.... Cochabamba, Bolivia, 1987.
- 3 - MENDES, J.M.B.; HASSUDA, S. - A geofísica aplicada na identificação da poluição do subsolo por depósito de rejeitos urbanos e industriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4. Brasília, 1986. Anais.... ABAS, 1986, pp. 528-32.
- 4 - GREENHOUSE, J.P.; SLAINE, D. Case studies of geophysical contaminant mapping at several waste disposal sites. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON AQUIFER RESTORATION AND GROUND WATER MONITORING, 2. Columbus, Ohio, 1982. Proceedings Columbus, 1982.