

VI-020 – AVALIAÇÃO DE SÍTIO CONTAMINADO USANDO O MÉTODO GEOFÍSICO DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO DIPOLO-DIPOLO

Giovanni Chaves Penner⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal do Pará. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Prof. Dr. UNICOC Ribeirão Preto.

Harry Edmar Schulz

Engenheiro Civil pela Fundação Educacional da Região de Blumenau. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Prof. Tit. SHS/EESC/USP.

Vagner Roberto Elis

Geólogo pela UNESP de Rio Claro. Mestre e Doutor em Geologia pela UNESP de Rio Claro. Prof. Dr. IAG/USP.

Endereço⁽¹⁾: Rua General Osório, 1000, Ap. 5 - Centro – Ribeirão Preto - SP - CEP: 14010-000 - Brasil - Tel: (16) 3931-5074 - e-mail: giovannipenner@hayoo.com.br

RESUMO

Sítios contaminados apresentam elevado potencial de contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. No presente estudo avaliou-se a problemática do descarte de resíduos de re-refino de óleos lubrificantes diretamente no solo. A região se caracteriza por uma cobertura superficial de colúvio superficial e dois tipos de solo subjacentes residual de basalto e residual de arenito. Para compreender melhor, indiretamente, a extensão da contaminação utilizou-se métodos geofísicos que avaliam a resistividade elétrica do solo. Foram realizadas campanhas para a determinação das resistividades elétricas das seções de interesse. Os resultados obtidos mostram valores compatíveis com os solos e evidenciaram a dimensão e extensão dos resíduos depositados nas cavas. O procedimento aplicado é simples e comumente aplicado em resíduos sólidos urbano, podendo ser aplicado em sítios contaminado onde os contaminantes apresentem contrastes resistivos.

PALAVRAS-CHAVE: Caminhamento Elétrico, Áreas Contaminadas, Óleos Lubrificantes.

INTRODUÇÃO

Nos anos 1970 a Indústria objeto começou a depositar seus resíduos provenientes dos processos de re-refino de óleos lubrificantes em uma área adquirida para este fim, onde foram escavados quatro tanques ou cavas, no sentido da declividade do terreno, com 6 m de profundidade, comprimento variando entre 49,3 a 41,0 m e largura de 36,0 a 24,2 m, com taludes laterais de 1:2 aproximadamente, perfazendo um volume total de aproximadamente 25.000 m³. Ao longo de cerca de 25 anos essas cavas foram quase totalmente preenchidas com resíduos. Os tanques não receberam qualquer tipo de impermeabilização de fundo e dos taludes laterais. Sob o sítio foram identificados dois aquíferos, um freático suspenso que abastece propriedades rurais nas imediações e o aquífero Guarani, mais profundo, que aflora nas cercanias e é a principal fonte de abastecimento de água do município onde os resíduos foram depositados. O descarte de resíduos nas cavas encerrou-se em 24/10/1995.

Ao iniciar um estudo de contaminação do solo e da água subterrânea faz-se necessária uma avaliação prévia das informações disponíveis e da extensão da contaminação gerada. Para identificação das alterações provocadas pelos contaminantes, geralmente, são usados métodos indiretos não penetrativos baseados na alteração das características geofísicas do subsolo, como por exemplo, a resistividade. Como justificativas para aplicação de métodos geofísicos com primeira ferramenta em estudos de contaminação de solo e água subterrânea podemos citar baixo custo e rápida aquisição de dados, quando comparado com os métodos de investigação direta. Instrumentos para medição de resistividade são amplamente conhecidos e utilizados em locais sem interferência, onde o contaminante contenha eletrólitos, para delineamento indireto da distribuição do produto em subsuperfície, orientando futuro posicionamento de sondagens e poços de monitoramento.

Em geral a utilização de geofísica na caracterização de uma área contaminada consiste na obtenção de informações a respeito da detecção e mapeamento da extensão da área alterada, profundidade da zona saturada, direção do escoamento subterrâneo e profundidade do substrato rochoso inalterado. Em alguns casos informações mais específicas podem ser importantes como: velocidade de escoamento, presença de fraturas e

escoamento na zona saturada, avaliação de interação entre os poluentes e o meio físico, detecção de tipos específicos de materiais em áreas de disposição de resíduos, definição da espessura e estrutura de depósitos de resíduos (ELIS, V. R. 2001). SAUCK et al. (2000) confirmaram a validade da aplicação de diversos métodos geofísicos no estudo da contaminação do solo e água subterrânea por vazamentos de petróleo e gasolina de uma refinaria. Sauck, (2000), em uma publicação esclarecedora, apresenta os três fatores chave que devem ser considerados na interpretação e modelagem de sítios contaminados por LNAPL. São eles: 1. Produção de ácidos orgânicos e carbônicos durante a biodegradação, 2. Dissolução de sais do solo natural e, finalmente, 3. A natureza do contaminante livre. Ele descreve detalhadamente cada um dos itens citados e propõe um modelo para a resposta geoeétrica nas imediações de sítios contaminados por LNAPLs. Atekwana et al. (2000) realizaram levantamento geoeétrico em amostras de solo utilizadas para contagem de bactérias em local contaminado por LNAPL. Nos pontos de alta contagem de bactérias a resistividade aparente foi mínima. Os autores acreditam que medidas de resistividade aparente proporcionam uma visualização de processos biogeoquímicos em sítios contaminados por LNAPLs.

Os autores não encontraram, na bibliografia consultada, estudos que mostrem aplicabilidade de métodos geofísicos na avaliação de resíduos industriais com características similares aos encontrados neste sítio. Assim essa foi a principal motivação para a publicação da presente pesquisa.

LOCALIZAÇÃO

A área da Indústria objeto está restrita a 20.122,18 m². As divisas são: ao sul e a leste com o terreno do senhor Welton Tadeu de Bortoli, ao norte com terreno do senhor Dalton Melo Reis e a oeste com a destilaria Galo Bravo.

Segundo Roseli (1995), a localidade é denominada Córrego do Campo e fica a 200 m do quilômetro 334,05 da Rodovia Alexandre Balbo (SP – 328), sendo o bairro mais próximo denominado Jardim Heitor Rigon, localizado no contorno norte do anel viário do Município de Ribeirão Preto.

SONDAGENS E POÇOS DE MONITORAMENTO

Para a compreensão adequada estratigrafia e hidrogeologia foram realizadas sondagens a trado mecanizado e poços de monitoramento nas imediações do sítio estudado. Acrescenta-se que tal procedimento foi realizado o controle dos resultados da interpretação geofísica.

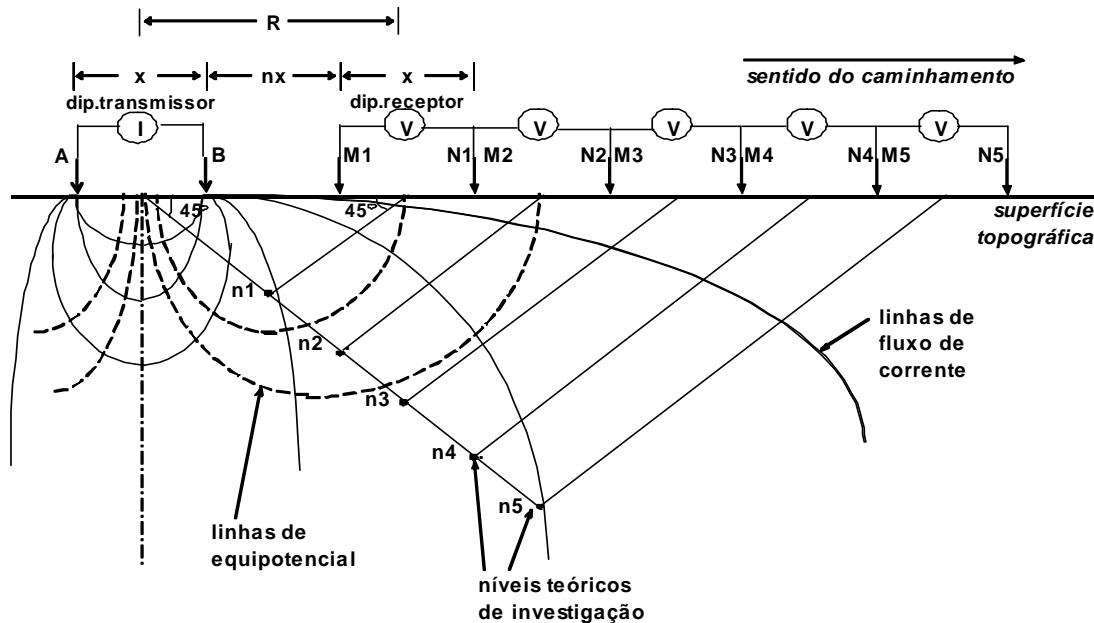
CAMINHAMENTO ELÉTRICO

Segundo ELIS, V. R. (2001), no momento, o arranjo de campo que vem sendo utilizado com bastante frequência em estudos ambientais é o caminhamento elétrico, dispositivo dipolo-dipolo (DD), como o esquema apresentado na Figura 1. Neste dispositivo, os eletrodos AB de introdução de corrente e MN de potencial são dispostos segundo um mesmo perfil (alinhados) e o arranjo é definido pelos espaçamentos $X=AB=MN$. A profundidade de investigação cresce com o espaçamento (R), e teoricamente corresponde a $R/2$. Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação, isto é, $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , atribuídas à intersecção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulos de 45°. Cada novo ponto de medida é determinado pelo deslocamento dos dipolos em uma distância igual a X, sendo os dados obtidos lançados em gráfico para as posições $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e interpolados, gerando uma seção de resistividade aparente.

As dimensões do procedimento bidimensional usados neste estudo foram: um espaçamento X de 10 m, e n incrementos variando de 1 a 5, o comprimento das linhas variaram entre 100 e 250 m. Os dados foram interpretados usando o programa comercial SURFER 6.0®, onde aplicou-se o método da krigagem universal e, adicionalmente programa RES2DINV semi-demo, o qual aplica um suavização não linear otimizando os dados mínimos quadrados (Loke, 1998).

Com base nas características metodológicas descritas e das características do sítio a ser investigado, elaborou-se um “mapa de investigação” englobando a área de disposição dos resíduos e seu entorno.

Figura 1 – Exemplo do fundamento conceitual da interpretação da seção de resistividade elétrica, arranjo dipolo-dipolo (DD).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentadas as seções (linhas de andamento) devidamente interpretadas. As figuras representam a interpretação dos resultados (neste caso resistividades reais) com o programa RES2DINV na versão 3.3 semi-demo (específico para interpretar seções geofísicas), sendo os dados interpretados por inversão usando a técnica de otimização dos mínimos-quadrados com suavização não-linear (LOKE, 1998).

Para cada imagem analisada com o programa RES2DINV, as interpretações geradas pelo programa apresentam uma escala de cores específica para aquela análise, não sendo possível efetuar uma comparação de cores para análises de diferentes linhas (seções). Para este tipo de análise torna-se, portanto, necessário usar diretamente os valores obtidos ou as suas ordens de grandeza. É importante ressaltar, também, que a escala horizontal e vertical das figuras de cada seção é diferente.

A análise da Figura 2, seção 1, sugere que o topo da zona saturada esteja entre 12,5 e 20 metros. Observa-se na Figura 2 uma variação brusca na resistividade elétrica para a profundidade 12,5 m, formando uma superfície quase plana. Essa superfície apresenta-se delineada, nesta seção, pelos valores de resistividade elétrica inferiores a 200 ohm.m. Comparando com os níveis da água medidos nas imediações (poço vizinho, sondagens mecanizadas e poços de monitoramento), esta constatação mostrou estar suficientemente bem fundamentada.

Palas elevadas alterações de resistividade elétrica e pela proximidade entre esta seção de investigação e a primeira cava (aproximadamente 15 metros), acredita-se que a região que abrange esta seção foi alterada pela presença dos resíduos, principalmente quando se atinge a zona saturada, e, em menor dimensão, na zona não saturada.

Na análise da Figura 3, seção 2, a interpretação evidencia a conclusão anterior acerca da zona saturada, com grande probabilidade de estar entre 12,5 e 20 metros (posteriormente esta conclusão foi corroborada pelos poços construídos no local). Percebe-se que a linha de investigação geofísica 2 seccionou a cava 1, ainda que o resíduo bruto seja resistivo eletricamente, nas zonas de maior aeração (laterais da cava) e zona saturada, o meio passa a condutor. Entende-se que reações químicas e/ou atividade biológica presente nestas zonas provoquem esta redução na resistividade. Uma causa adicional pode ser a alteração das características naturais do solo provocada pelo movimento de terra quando da confecção das cavas.

Figura 2 – Seção 1 interpretada com o programa RES2DINV.

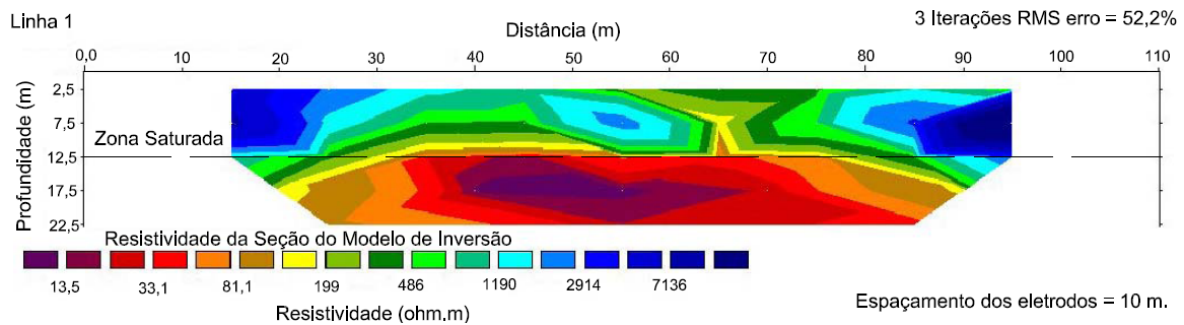
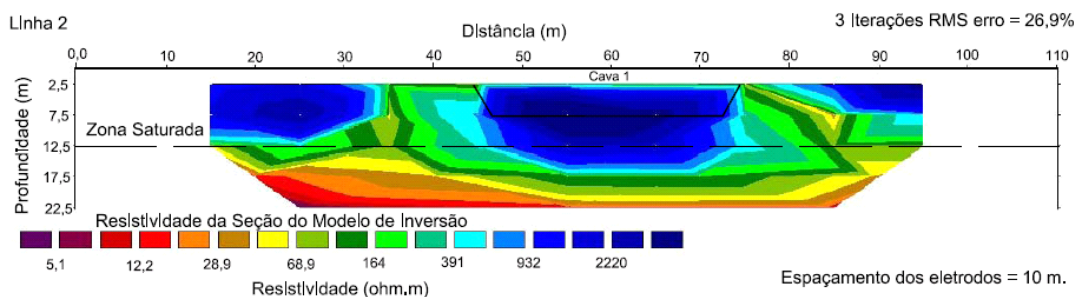


Figura 3 – Seção 2 interpretada com o programa RES2DINV.

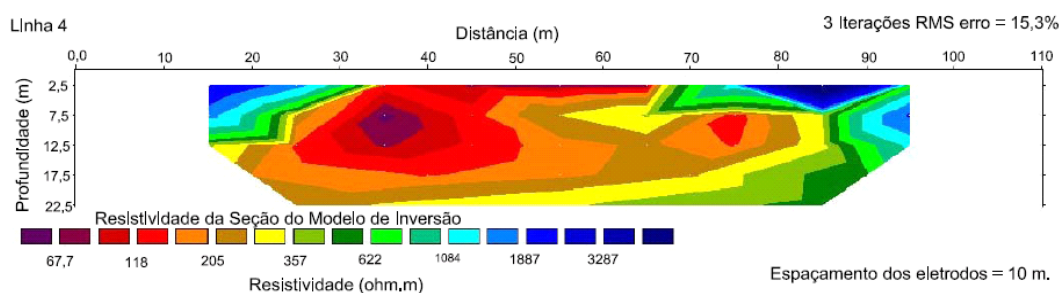


Observa-se, principalmente, na Figura 3 que os limites inicialmente definidos para a cava 2, quais sejam, profundidade de 6,0 m e taludes laterais de 1:2 não são observados. Acredita-se que houve movimentação (acomodação), lixiviação e compactação do resíduo ao longo dos anos.

Para a seção 4, tendo por base o poço de monitoramento 05, conclui-se, pela observação da Figura 4 que o posicionamento da zona saturada está abaixo dos 22,5 metros (limite de interpretação do modelo utilizado).

Pela Figura 4 pode-se inferir que houve movimento de líquidos percolados das cavas descendente e lateral (do centro para esquerda) no sentido da região mais condutora eletricamente (há uma descentralização da “mancha” observada nas figuras). Mais uma vez a afirmação anterior encontra base nas sondagens realizadas e poços de monitoramento. Frisa-se que nas proximidades deste caminhamento observou-se em sondagens e poços na profundidade aproximada de 12 m, solo residual de arenito. Pelo fato de o arenito seco apresentar resistividade elevada (ordem de grandeza de 1.000 ohm.m ou superior), conclui-se que a elevação da condutividade elétrica do solo deve-se à presença ou passagem dos líquidos percolados em questão (água percolada ou líquido “exsudado” do material das cavas). Por esta primeira interpretação, entendeu-se que esta seção de investigação está sendo fortemente influenciada principalmente pelos líquidos percolados da cava 2, pois há um desnível da ordem de 2 a 3 metros entre as cavas 2 e 3.

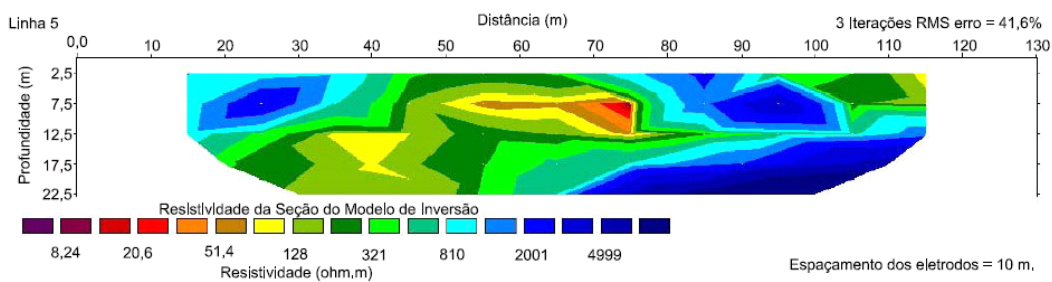
Figura 4 – Seção 4 interpretada com o programa RES2DINV.



Como para a seção 4, para a linha 5 não se pode mais definir a localização da zona saturada, principalmente quando se compara a Figura 5 com os perfis das sondagens e poços. A conclusão dos poços de monitoramento é clara em mostrar que não há água presente à profundidades superiores a 20,0 m (nem zona saturada, nem franja capilar). Entretanto, pode-se concluir que a superfície quase plana que atravessa a Figura 6 na profundidade próxima a 12,5 m é o contato entre o solo coluvionar superficial e o solo residual de arenito. Esta conclusão é baseada, principalmente, nos perfis do furo da sondagem 04 e dos poços de monitoramento 06 e 07.

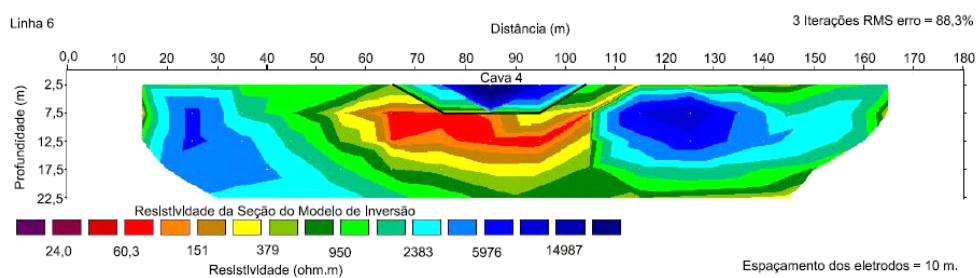
Como na seção anterior, infere-se que esteja havendo movimento descendente e lateral (do centro para esquerda) no sentido da região mais condutora eletricamente. A região altamente resistiva, delineada no canto direito inferior por valores de resistividade elétrica superiores a 2.000 ohm.m na Figura 5, sugere a presença de arenito seco.

Figura 5 – Seção 5 interpretada com o programa RES2DINV.



A seção de investigação 6 atravessou a cava 4 (mais recente cronologicamente). Houve problemas de leitura (polarização), principalmente na região entre 80 e 110 metros da Figura 6. Crê-se que as dificuldades nas medidas de resistividade foram provocadas pelo fato de o resíduo estar mais plástico e liberando líquido ácido ($\text{pH} \cong 0,1$). Como nas seções 4 e 5, não se identificou a presença da zona saturada. Pela Figura 6, infere-se estar havendo movimento descendente de líquidos percolados (deslocamento vertical da mancha). Como na seção 5, no canto direito da Figura 6 há uma região mais resistiva eletricamente, sugerindo que haja a presença de arenito seco.

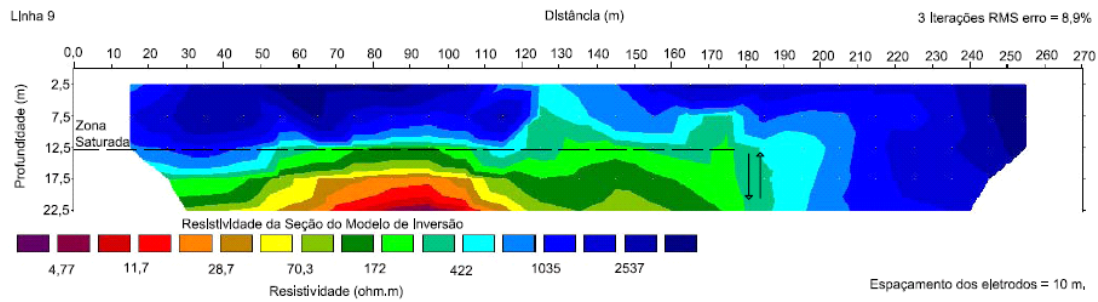
Figura 6 – Seção 6 interpretada com o programa RES2DINV.



A seção 9, indicada na Figura 8, é um corte transversal em relação às seções já descritas e numeradas de 1 a 8. Interessantemente, a interpretação mostra concordância com relação à zona saturada das seções de 1, 2 e 3. Isto indica que a interpretação inicial do limite dessa zona estar de fato entre 12 e 15 metros é correta. Também se verificou concordância com relação às seções de 4 a 8, nas quais há impossibilidade de identificação da zona saturada.

A região de baixa resistividade elétrica, parte inferior da Figura 8 (tendendo ao vermelho), parece ser provocada pela presença de contaminantes. Infere-se ainda que esteja havendo movimento frontal de contaminantes em direção a esta seção (saindo do plano do papel).

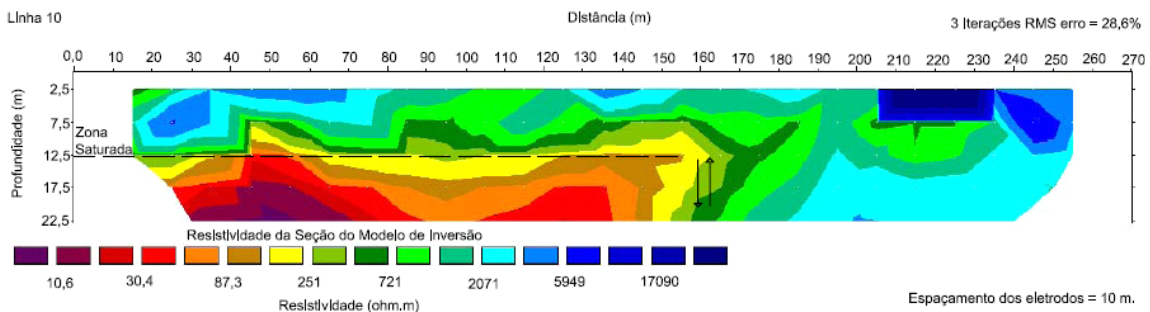
Figura 8 – Seção 9 interpretada com o programa RES2DINV.



Para a seção 10 (Figura 9), que intercepta o prolongamento das linhas 1 a 5 e as próprias linhas 6 a 8, a interpretação mostra mais uma vez concordância com relação à zona saturada das seções de 1, 2 e 3. Infere-se novamente que esta está entre 12 e 15 metros (o que é também condizente com o nível da água no poço vizinho, medido no mesmo dia, que apresentava-se em 14 metros). Também se verificou concordância com relação às seções de 4 a 8, onde há impossibilidade de identificação da zona saturada.

A depleção na região central da Figura 9, distância de 110 metros, pode ser provocada pelo poço, que estava em operação no período desse levantamento. Como ocorreu na seção 9, a região de baixa resistividade elétrica, parte inferior da Figura 9, pode ser provocada pela presença de contaminantes e sua evolução ao se deslocar na zona saturada. Outras hipóteses para a região mais condutora eletricamente podem ser: uma fossa mantida sem qualquer controle que será abordada com mais detalhe no subitem seguinte e característica da própria formação geológica. Ainda semelhantemente à seção 9, infere-se que esteja havendo movimento frontal (perpendicular ao plano da figura).

Figura 9 – Seção 10 interpretada com o programa RES2DINV.



A seguir são apresentados os mapas de resistividade aparente em função das profundidades de investigação. As linhas em vermelho nas Figuras 10 a 14 representam as curvas de nível e contornos das cavas, cercas, estruturas e cavas do sítio estudado (conforme informação gerada pelo levantamento topográfico realizado na área e sobreposta à figura).

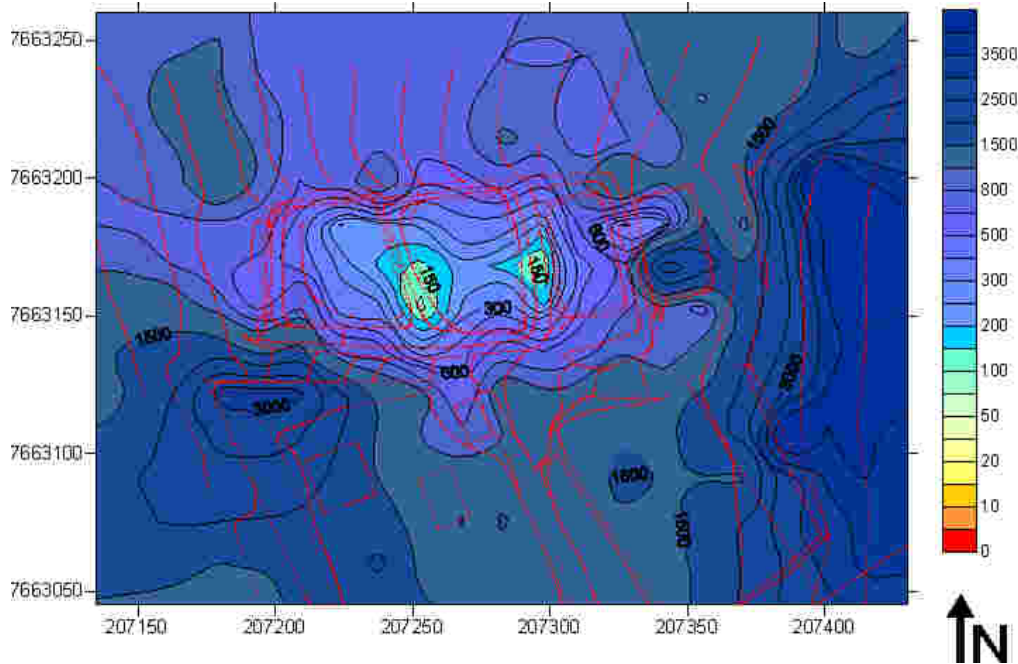
A análise da Figura 10 mostra que, para a profundidade de investigação de 10 metros, não há interferência da zona saturada. Para as cavas 1 e 2 nas zonas de maior aeração e provável direção da drenagem das chuvas quando precipitadas, houve redução na resistividade elétrica (meio condutor), sendo que para as cavas 3 e 4 esta constatação não é válida. Conclui-se neste caso que a idade das cavas (cava 1 mais antiga e cava 4 mais recente) e a geologia deve ser, também, considerada na análise.

A interpretação da Figura 11, para profundidade de 15 metros, em conjunto com as informações dos perfis dos furos de sondagem e poços, sugere que esteja havendo escoamento de água subterrânea na direção normal à superfície do terreno (direção das curvas de nível). Contudo, não é perceptível a presença de contaminação atingindo a zona saturada, salvo as alterações de resistividade elétrica no centro das cavas.

A avaliação da Figura 12 para a profundidade de 20 metros reafirma o que foi dito para Figura 11 e sugere evolução da alteração de resistividade elétrica na direção normal à superfície do terreno, supostamente a

mesma do escoamento da água subterrânea. A evolução do escoamento subterrâneo na direção normal à superfície do terreno pode ser compreendida quando se observa os perfis de sondagens e poços de monitoramento e o perfil geológico-geotécnico. A mudança brusca de litologia (solo residual de basalto para solo residual de arenito) provavelmente causa a mudança de inclinação do topo da zona saturada.

Figura 10 – Mapa de resistividade aparente – Nível 1 (profundidade teórica 10 metros) – Interpretado com o programa SURFER 6.0.



Sugere-se que a cava 1, mais antiga cronologicamente, está liberando (ou liberou) quantidade maior de soluto (o líquido “exsudado” do material das cavas).

Figura 11 – Mapa de resistividade aparente – Nível 2 (profundidade teórica 15 metros) – Interpretado com o programa SURFER 6.0.

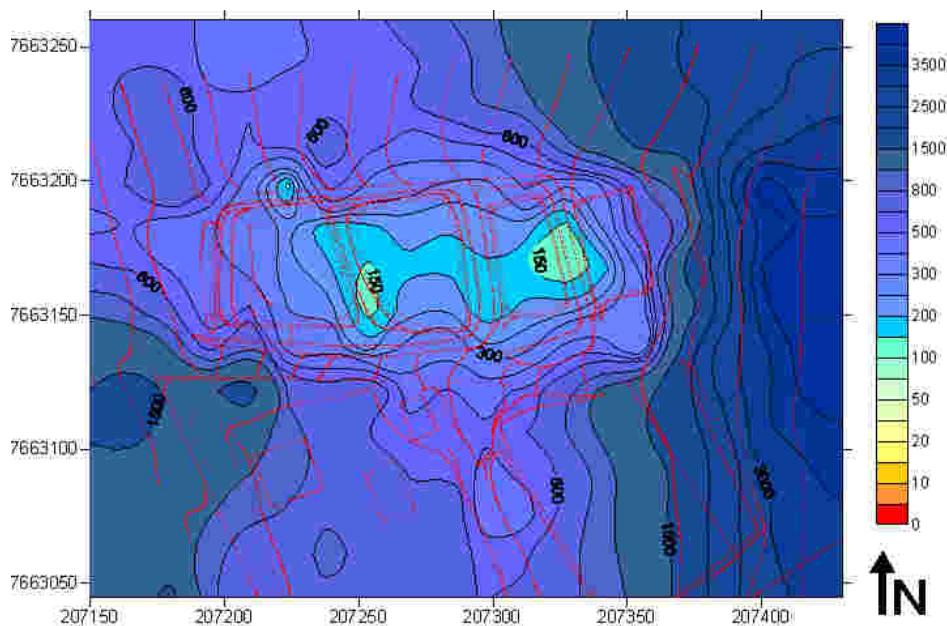
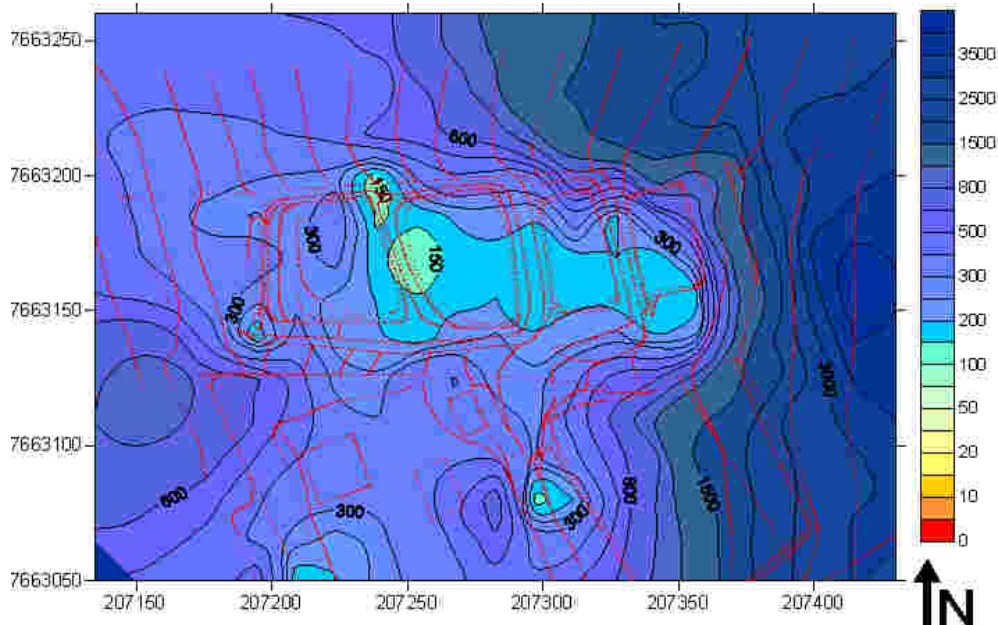
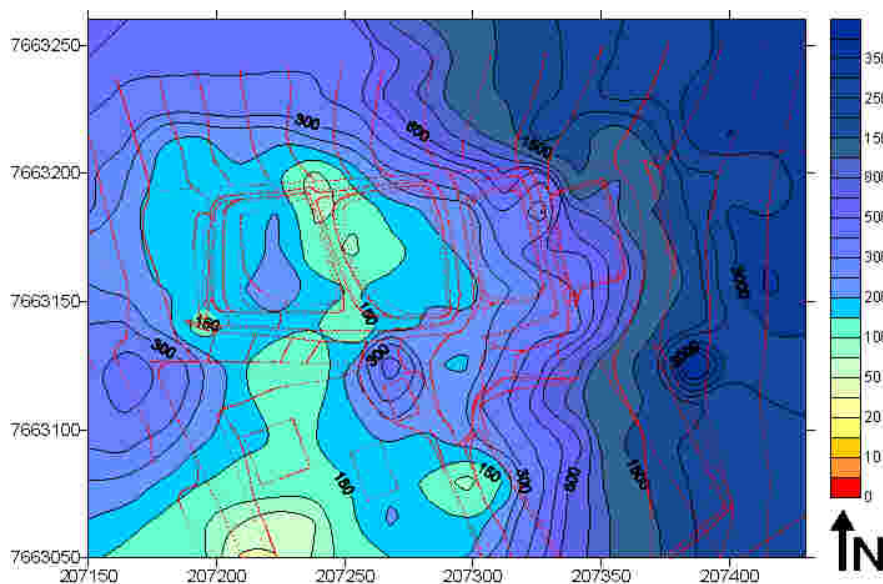


Figura 12 – Mapa de resistividade aparente – Nível 3 (profundidade teórica 20 metros) – Interpretado com o programa SURFER 6.0.



A análise da Figura 13 para a profundidade de 25 metros indica maior espalhamento lateral. Sugere-se que os valores de baixa resistividade elétrica (meio condutor) a montante foram provocados pela proximidade das cavas e que houve contato com líquidos percolados. Todavia, por se tratar de uma geologia complexa deve-se ter cautela neste tipo de afirmação.

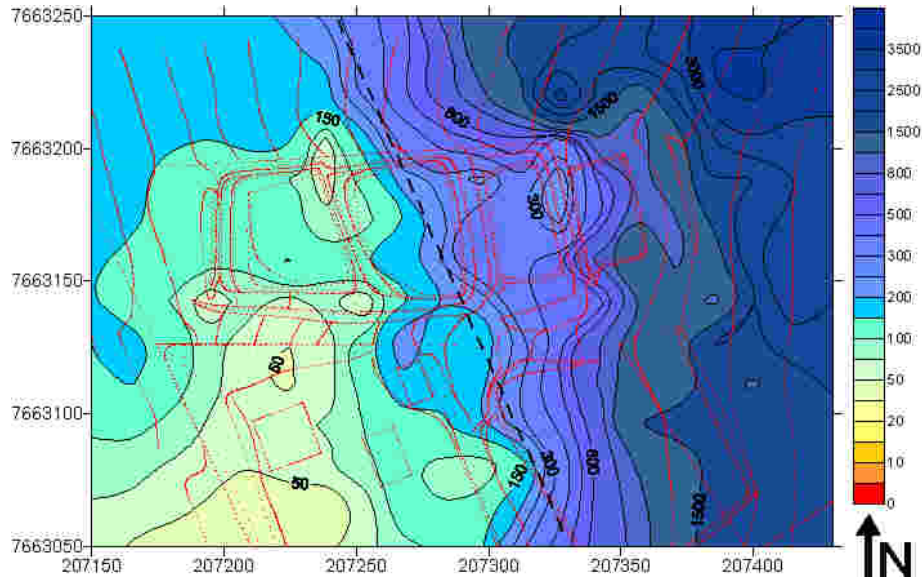
Figura 14 – Mapa de resistividade aparente – Nível 4 (profundidade teórica 25 metros) – Interpretado com o programa SURFER 6.0.



Como para o nível anterior, a interpretação da Figura 14 mostra que mesmo para uma profundidade teórica de 30 metros são visualizados indícios de alteração, provavelmente, decorrente do material lançado nas cavas.

Ainda com relação à Figura 14, acredita-se que o tracejado, próximo a linha com resistividade elétrica aparente de 200 ohm.m, defina o contato do solo residual de basalto com o solo residual de arenito.

Figura 14 – Mapa de resistividade aparente – Nível 5 (profundidade teórica 30 metros) – Interpretado com o programa SURFER 6.0.



CONCLUSÕES

O levantamento geofísico mostrou ser uma ferramenta de avaliação preliminar de grande valia. Quando interpretado e confrontado com informações locais foram definidas as regiões das cavas, zona saturada, contato entre diferentes tipos de solos e indícios de contaminação.

Acredita-se que este método apresenta facilidades de aplicação e interpretação, portanto, ideal para ser aplicado a sítios contaminados onde os contaminantes apresentem contrastes resistivos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, que apoiou este trabalho com os processos 00/09933-0 e 01/10302-7, bem como à FUNADESP, que apóia esta pesquisa com o processo 3300142. Esse recurso permite a continuidade dos trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ELIS, V.R. (2001). III Escola de Verão de Geofísica. Geofísica Aplicada ao Estudo da Poluição de Solos e Águas Subterrâneas. IAG-USP. São Paulo, 194p.
2. LOKE, M.H. (1998). *RES2DINV* version 3.3 for Windows 3.1 and 95. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Penang: M.H. Loke Software User's Manual, 35p.
3. ROSELI, M.L. (1995). Avaliação Hidrogeológicas e Programa de Monitoramento da Água Subterrânea. Relatório Técnico.
4. SAUCK, W.A. (2000). A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of applied geophysics*. v. 44, p. 151 - 165.
5. SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A.; NASH, M.S. (1998). Elevated conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. *Journal environmental and engineering geophysics*. v. 2, p. 203 - 212.
6. SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A.; WERKEMA JR, D.D. (2000). Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of applied geophysics*. v. 44, p. 167 - 180.