

## Desenvolvimento de mini sonda para avaliações ambientais a pequenas profundidades

Fabio Taioli\*, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

José Domingos Faraco Gallas, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Vilmondes Ribeiro, INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT

Patrícia Braga Toledo Iezzi, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Diego Potomati Vaccaro Nascimento, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Copyright 2007, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 10<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 November 2007.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 10<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

The evaluation of soil and groundwater contamination has been an important task in the geosciences field and pushing on the methodological improvement. The contamination extension is normally investigated using geophysical methods or boreholes and chemical analysis. Otherwise, several contamination problems are at low depths (less than 0.5m) allowing the easy access to the contaminated region. Therefore, a low-cost and simple system (mini-probe Wenner) was developed and tested and it is aimed at low depth resistivity measurements. The system is formed by a current source (AC) and a PVC probe which contains a Wenner array with a electrode spacing of 1 cm. Laboratory tests show that the current source works adequately in the resistance range normally associated with contaminated materials while the system tests (including the current source and probe) indicated apparent resistivity values very similar to the resistivity values calculated using the equation proposed by Archie, in the 1.5 to 57  $\Omega \cdot m$  interval. Preliminary field tests showed that the mini-probe is easily applicable in sandy and sand-silty soils while in clayey or hard soils is difficult its introduction. Therefore, interesting applications to the proposed system are the study of agricultural areas or the study of contamination in predominantly sandy litologies.

### Introdução

A extensão tanto em área como em profundidade de contaminações por produtos orgânicos ou inorgânicos é normalmente definida primeiramente por métodos indiretos, particularmente os geofísicos (eletroresistividade, eletromagnético e GPR), e por métodos diretos (sondagens, poços de monitoramento, análises químicas etc.). O uso de técnicas indiretas depende de uma série de fatores tais como a profundidade de interesse, resolução desejada,

constituição mineralógica e grau de saturação do solo, interferências presentes na área de estudo, entre outros. Desta forma, muitas vezes sua aplicação torna-se prejudicada ou mesmo inviável. Por outro lado, muitos dos problemas de contaminação são bastante rasos (menos de 0,5 metro de profundidade) permitindo o fácil acesso à região contaminada. Este trabalho apresenta testes controlados de uma pequena sonda (Figura 1) que possibilita a medida da resistividade do solo e/ou água subterrânea *in situ*, a pequenas profundidades, sem que seja necessária a instalação de poços de monitoramento, portanto, permitindo medidas rápidas e a extremo baixo custo. Consiste em uma sonda dotada de quatro eletrodos dispostos segundo o arranjo Wenner em conjunto com uma fonte de corrente e dois multímetros para a medida da corrente e da diferença de potencial (Figura 2), o que torna possível a execução de uma medida convencional de resistividade em diferentes profundidades à medida que a sonda é cravada no solo. Desta forma é possível executar-se medidas em diferentes profundidades e se obter a seção de distribuição de resistividade próxima à superfície.

### Resultados obtidos

A sonda para medidas de resistividade foi baseada em conceito apresentado por Stieglitz (2003) e desenvolvida empregando um pequeno arranjo Wenner. A sonda, montada sobre uma base de PVC, consiste em quatro anéis de fio de cobre com 1 mm de diâmetro e espaçados entre si por 0,01m. É montada na ponta de um tubo de aço galvanizado que é gradualmente inserido no solo por percussão, até cerca de 1,5m, se o solo permitir.

O sistema é composto de uma fonte de alimentação e de um oscilador de onda senoidal, chamado de duplo-T, cuja frequência nominal de oscilação foi ajustada para 1200 Hz, a fim de compatibilizar com a maioria dos multímetros encontrados no mercado (Taioli et al., 2006). A corrente de saída pode variar até o máximo de 5A. Testes de bancada mostraram que para resistências com valores de até 100 $\Omega$  os erros foram menores do que 6%, enquanto para resistores até 5.000 $\Omega$  a diferença entre o valor medido e o real não ultrapassou 10%. Considerando-se que a perspectiva de uso da sonda é para trabalhos em áreas contaminadas onde as resistividades raramente ultrapassam 100 $\Omega \cdot m$ , considerou-se aceitável o comportamento da fonte de corrente.

Para os ensaios em amostras de solo utilizou-se areia padrão, normalmente usada em pré-filtros de poços tubulares, que foram quarteadas até se chegar a porções com volume aproximado de 16 litros. A porosidade da

amostra foi determinada por meio da medida da densidade do material, obtendo-se o valor de 0,409. Para preparação do eletrólito foram escolhidas dez diferentes concentrações de solução de NaCl para a realização das medidas efetuadas com a sonda de eletrorresistividade. A condutividade elétrica da solução foi medida utilizando-se um condutivímetro *Multiline P3 pH/LF-SET*. No período dos experimentos a temperatura do laboratório manteve-se entre 21 e 25°C.

A Figura 3 apresenta os resultados da condutividade elétrica da solução em função de sua concentração de NaCl.

As soluções foram colocadas em recipiente com areia até a saturação da amostra. Inseriu-se, então, a mini-sonda na amostra até as profundidades de 5, 10 e 15cm, efetuando-se leituras dos valores de corrente e diferença de potencial e calculando-se as resistividades aparentes para cada uma das profundidades. Os valores obtidos foram utilizados na equação conhecida como *Lei de Archie* (Archie, 1942 apud. Telford et al., 1990) de forma a se obter a resistividade teórica.

$$\rho = a \rho_w \varphi^{-m}$$

onde:

$\rho$  = resistividade "bulk" (volumétrica).

$\rho_w$  = resistividade da água dos poros.

$\varphi$  = porosidade expressa como uma fração por unidade de volume.

$a$  → relativo à porosidade da rocha, sendo ligeiramente menor que 1 para rochas com porosidade intergranular e ligeiramente maior que 1 para rochas com "porosidade" de juntas.

$m$  → é o parâmetro de cimentação, sendo um pouco maior que 2 para rochas cimentadas e bem classificadas e um pouco menor que 2 para rochas mal classificadas e mal cimentadas.

A Lei de Archie supõe que os poros das rochas estejam completamente saturados por água e que o volume de água contido reflita a porosidade. Isto nem sempre é verdadeiro, uma vez que os poros podem conter ar, gás ou mesmo petróleo. Desse modo, torna-se necessário introduzir o índice de resistividade, que é a relação entre a resistividade da rocha com o grau de saturação considerado e com os poros efetivamente preenchidos com água. Define-se como *grau de saturação S* a fração de volume ocupada por água em relação ao volume total dos poros. Assim a resistividade da rocha será dada por

$$\rho = ab\varphi^{-m} S^{-n} \rho_w$$

onde:

$n \leq 2$  (Telford et al., 1990) e

$b = 0,6$  e  $n = 2,25$  para arenitos e calcários arenosos de porosidade < 40%.

$b = 0,4$  e  $n = 2,1$  para rochas carbonáticas de porosidade < 25% (Orellana, 1972).

Foram utilizados os valores para  $a = 0,351$  e  $m = 1$ , adotados por Keller & Frischknecht (1977). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4, e evidenciam uma ótima concordância entre os valores obtidos e os esperados (coeficiente de Pearson = 0,996). Os desvios que ocorreram podem ser atribuídos, em parte, a sais impregnados na própria areia utilizada para os experimentos, uma vez que as amostras não foram previamente lavadas para a execução dos ensaios.

A Figura 5 apresenta os dados de resistividade aparente obtidos com a mini-sonda em função da concentração da solução, enquanto a Figura 6 coloca os valores obtidos no gráfico de salinidade versus resistividade apresentado por Keller & Frischknecht, 1977. Observa-se que as medidas permitiram um ótimo ajuste, com coeficiente de Pearson = 0,995, e acompanharam a tendência dos gráficos propostos por aqueles autores.

## Conclusões

O objetivo desta mini-sonda é sua aplicação em áreas contaminadas rasas, possíveis de serem atingidas introduzindo-se a sonda por percussão manual. Os testes de laboratório sobre o circuito da fonte de corrente evidenciaram erros menores do que 10% para valores de resistências até 5000Ω, enquanto para resistências até 100Ω os erros foram inferiores a 6%, considerando-se os erros aceitáveis visto que solos contaminados normalmente apresentam resistividades aparentes inferiores a 100Ω.m (Gallas, 2000; Gallas et al., 2005). Testes utilizando areia e soluções padrões levaram a valores de resistividade aparente medidos muito próximos dos valores de resistividade calculados utilizando-se a equação proposta pela lei de Archie, no intervalo de 1,5Ω.m a 57Ω.m. Apesar de não terem sido efetuadas medidas em amostras saturadas com soluções de menores concentrações, esta faixa de valores, na maioria das situações, é compatível com os valores de resistividades observados em áreas contaminadas. Os valores de resistividade obtidos foram consistentes com as concentrações das soluções utilizadas quando comparadas com os observados por Keller & Frischknecht (1977). Aplicações interessantes para o sistema proposto podem ser o estudo de salinização de áreas agrícolas, onde normalmente se tem solo arado e fofo, ou estudo de contaminações rasas em litologias predominantemente arenosas. Uma evolução do sistema que pode ser interessante é a instalação de vários segmentos com o arranjo Wenner, colocados em distâncias fixas em uma mesma sonda, e utilizá-la como sistema de monitoramento multinível, para isso simplesmente chaveando as alimentações (eletrodos AB) e os canais de leitura (eletrodos MN).

## Agradecimentos

Os autores expressam seu agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processo 03-08714-0) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de Iniciação Científica do quinto autor, e ao Centro de Pesquisas em Águas Subterrâneas – CEPAS-USP pela cessão da infraestrutura laboratorial.

## Referências

- Gallas, J. D. F.; Taioli, F. ; Silva, S. M. C. P. ; Coelho, O. G. W. ; Paim, P. S. G.,** 2005, Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, n. 1, p. 51-59.
- Gallas, J. D. F.,** 2000, *Principais Métodos Geoelétricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental*. Rio Claro, 174p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Keller, G. V. & Frischknecht, F. C.,** 1977, *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford: Pergamon Press, 517 p.
- Orellana, E.,** 1972, *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo, 523 p.
- Stieglitz, T.,** 2003, *Measurements of Bulk Ground Conductivity at Sites of Submarine Groundwater Discharge, and Comparison with Other Methods*. Preliminary Report to the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrological Program on the IOC/IHP/IAEA Submarine Groundwater Discharge Intercomparison Experiment, Ubatuba, Brazil, 17 to 21 November 2003. pp. 17-26.
- Taioli, F.; Gallas, J.D.F.; Ribeiro, V.; Iezzi, P.B.T; Nascimento, D.P.V.,** 2006, Desenvolvimento e testes de mini-sonda Wenner para avaliação de contaminações rasas. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.26, n.4 (*in press*).
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E.,** 1990, *Applied geophysics*. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 770 p.



Figura 1 – Mini sonda de resistividade com arranjo Wenner



Figura 2 – Sistema completo, com a fonte de corrente, multímetros de leitura e sonda.

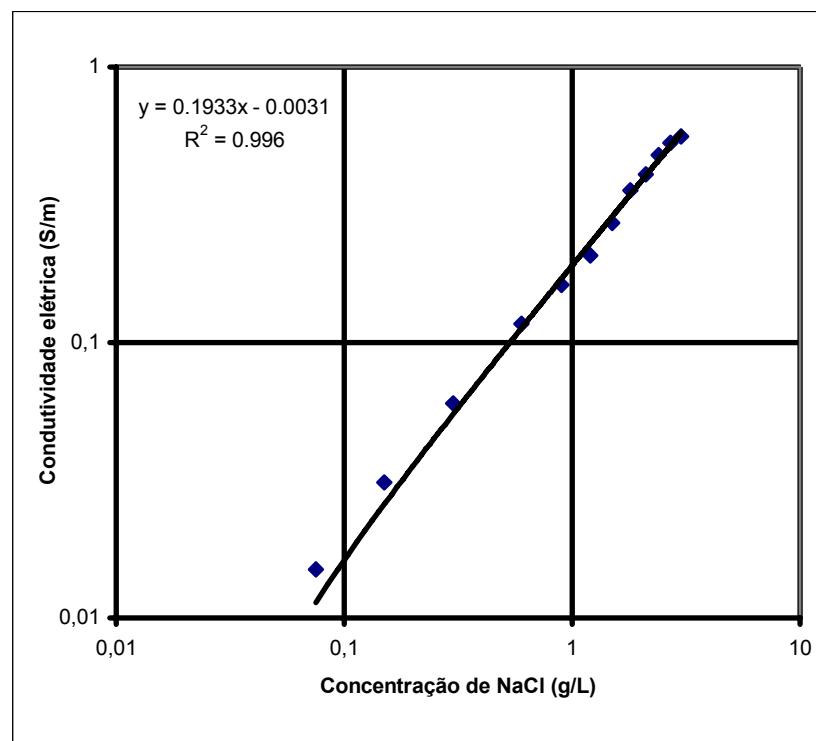


Figura 3 - Condutividade elétrica da solução em função da concentração de NaCl (medidas efetuadas em laboratório).

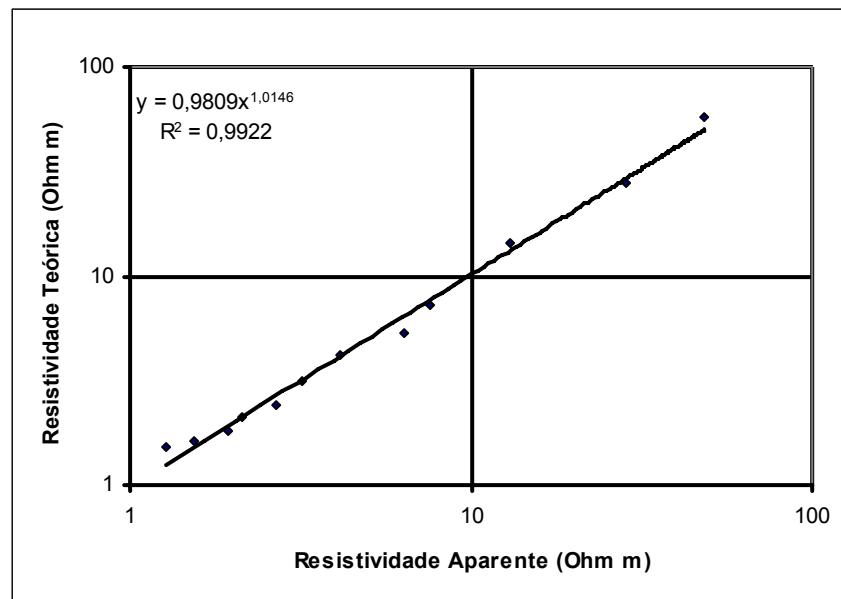


Figura 4 – Comparação entre os valores medidos utilizando a mini-sonda e os esperados considerando-se a lei de Archie.

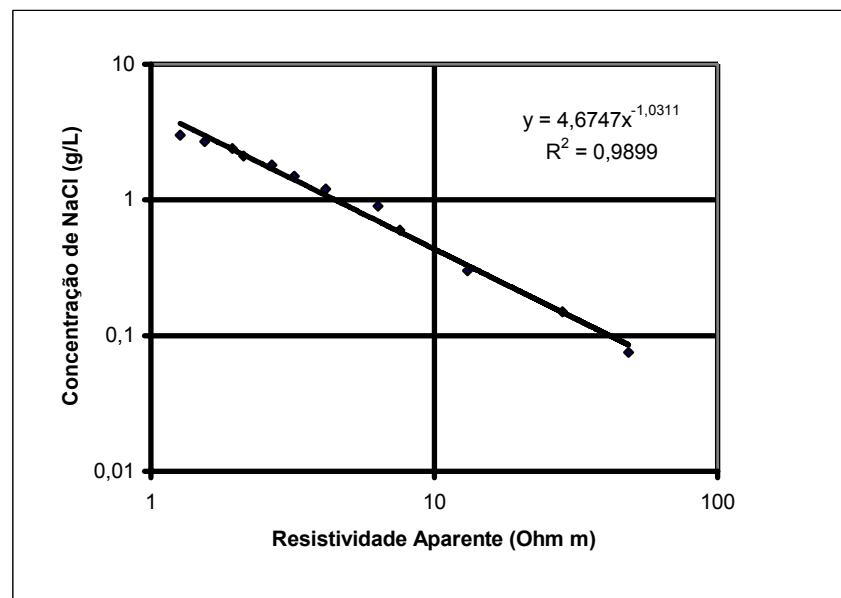


Figura 5 - Resistividade aparente obtida com a mini-sonda em função da concentração de NaCl da solução.

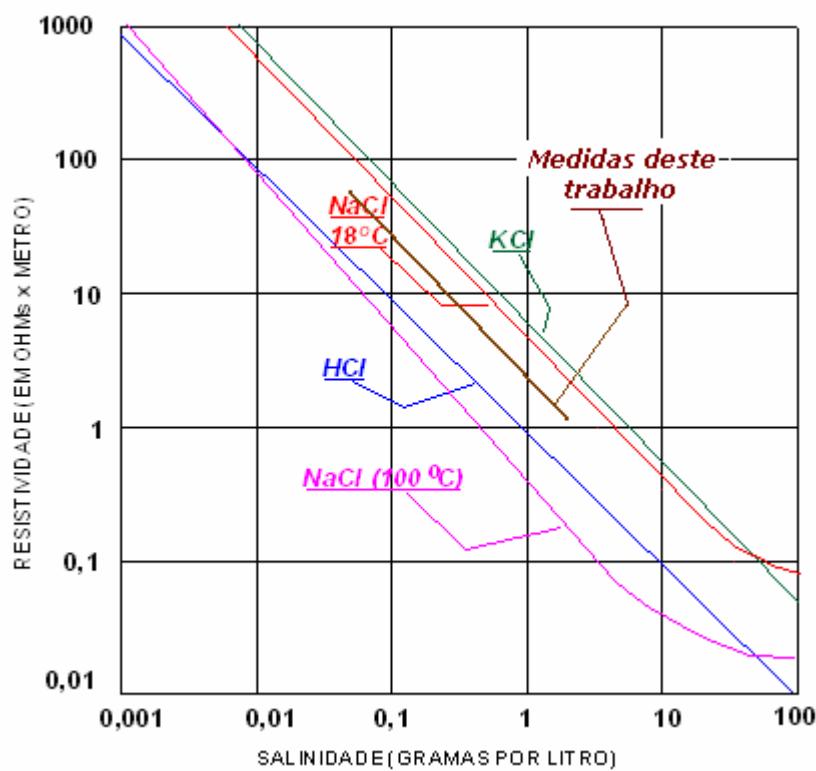


Figura 6 – Comparação dos valores obtidos neste trabalho com os dados de resistividade em função da concentração de sais em solução à temperatura de 18°C e NaCl também a 100°C apresentados por Keller & Frischknecht, 1977.