



Hidrogeofísica: estado da arte e perspectivas

Olivar A. L. de Lima, CPGG/UFBA

Copyright 2004, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, 26-28 de setembro de 2004. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecno-científica do I SR-SBGf mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

A demanda crescente de água potável, no mundo, tem salientado a necessidade cada vez maior da adoção de esquemas de exploração e manejo conservativos dos recursos hídricos disponíveis. Para tanto, é necessário dispor de formas eficientes e econômicas de determinar valores apropriados dos vários parâmetros estruturais e hidráulicos de um aquífero. Neste trabalho, pretendo mostrar como os métodos geoeletricos, através de sondagens superficiais, podem ser aplicados para produzir modelagens estruturais e hidráulicas de sistemas aquíferos regionais. Algumas técnicas úteis para interpretação litoestrutural de reservatórios são revisadas. Ressalto também o uso de modelos petrofísicos, propostos para determinar argilosidade, porosidade e permeabilidade de aquíferos a partir dos parâmetros geoeletricos medidos em sondagens superficiais.

Introdução

O conhecimento lito-estrutural e da variabilidade espacial dos parâmetros de armazenamento e transmissão de água de um aquífero é essencial tanto para manejo e otimização de sua exploração, quanto para orientar formas apropriadas de remediação, no caso de sua eventual contaminação.

O método geoeletrico, na forma de sondagens de superfície, tem sido usado com muito sucesso na exploração de água subterrânea, principalmente na determinação da geometria de aquíferos e na inferência da qualidade de suas águas. Embora a interpretação desses dados seja um problema inverso mal posto e sujeito a instabilidades e não-unicidade, técnicas robustas uni e bidimensionais, têm sido propostas, as quais produzem soluções aproximadas que capturam aspectos essenciais da estrutura geoeletrica do subsolo (GUPTA et al., 1997; PORSANI et al., 2001).

Análise de ensaio de bombeamento no tempo constitui a técnica clássica de determinar as propriedades de armazenamento e de transporte de água num aquífero. Todavia, esse procedimento é também sujeito a não-unicidade e tem custo elevado pela necessidade de usar poços especiais para as medições. Assim, por razões econômicas, ela é bastante restringida em número. Sondagens geoeletricas podem servir para interpolar esses parâmetros na região entre poços ensaiados.

Resultados geoeletricos obtidos numa primeira etapa de inversão orientada para determinar a geometria de um aquífero, podem também ser usados em sua modelagem hidráulica. Várias relações, analíticas ou empíricas, são disponíveis relacionando parâmetros hidráulicos e propriedades elétricas (resistividade e/ou polarizabilidade do aquífero). Modelos petrofísicos recentes, baseados em teorias de misturas, têm se mostrado adequados para computar argilosidade, porosidade e permeabilidade de reservatórios a partir de suas propriedades elétricas (LIMA & SRI NIWAS, 2000; LIMA et al., 2004).

Neste trabalho, são revisadas algumas técnicas robustas de inversão de dados geoeletricos usadas na recuperação da estrutura e dos parâmetros elétricos do subsolo. Modelos petrofísicos atuais são analisados e avaliados em sua aplicabilidade de computar, num segundo passo de inversão, propriedades hidráulicas (porosidade e permeabilidade) a partir das propriedades elétricas determinadas na primeira etapa. Exemplos práticos obtidos em diferentes aquíferos clásticos do estado da Bahia demonstram a adequabilidade desses procedimentos. Por fim, procura-se apontar melhorias e desenvolvimentos futuros nesses procedimentos.

Procedimentos de Interpretação

A inversão unidimensional de sondagens de resistividade e/ou de polarizabilidade elétrica é realizada a partir da combinação da solução teórica do problema de determinar o potencial elétrico causado por um sistema de corrente injetado num terreno horizontal multi-estratificado, com uma descrição física adequada da sub-superfície. Esta, deve ser dada na forma de um conjunto mínimo de parâmetros, a serem efetivamente determinados dos dados observados e calculados teoricamente usando mínimos quadrados. Esse processo de inversão, normalmente, é dificultado pela natureza essencialmente não-linear do problema elétrico inverso. Esquemas de otimização global ou de inversão robusta não-linear que incluem uma quasi-linearização do problema inverso, junto com o emprego de esquemas iterativos de inversão linear, tem sido propostos para encontrar soluções adequadas para problemas práticos da hidrologia subterrânea (SEN et al., 1993; ZOHDY, 1989; PORSANI et al., 2001). Obviamente, problemas normais de não-unicidade e instabilidade, podem ser reduzidos pelo uso de informação *a priori* sobre a grandeza de alguns dos parâmetros geofísicos do modelo geológico do terreno.

GUPTA et al. (1997) apresentam um esquema de inversão direta que idealiza um terreno genérico constituído por um grande número de camadas finas de mesma espessura, que é previamente fixada. Neste trabalho, eles desenvolvem relações de recorrência tanto para computação direta quanto inversa. Um resultado

interessante é que com esse procedimento, o problema direto se torna linear e tratável por um esquema de inversão linear de norma mínima, para obter os coeficientes de reflexão e a resistividade da primeira camada e, portanto, para resolver o problema inverso de modo completo. Tal esquema direto, pode constituir um primeiro passo no processo de interpretação de sondagens em áreas onde existem poucas informações geológicas quantitativas.

Esquemas de modelagem e inversão para modelos de terrenos bidimensionais também estão sendo aperfeiçoados no CPGG/UFBA, partindo de algoritmos numéricos de diferenças finitas (MEDEIROS, 1987; FERREIRA, 1999; PINHEIRO NETO, 2000). Nesse sentido, tem-se buscado aperfeiçoar a modelagem, em termos de precisão e agilidade, e aplicar procedimentos eficientes de otimização similares aos do caso unidimensional. No caso de problemas efetivamente tridimensionais, estamos ainda usando pacotes comerciais tais como RES3DINV Ver. 2.13 (GEOTOMO, 2003).

Modelos Petrofísicos

LIMA e SHARMA (1990, 1992) propuseram um modelo petrofísico para representar a condutividade elétrica de arenitos argilosos usando um procedimento construtivo descrito através dos seguintes passos: (i) uma representação teórica apropriada do comportamento de uma partícula carregada de argila, aproximada na forma esférica; (ii) a determinação da resposta de uma lama ou folhelho constituído dessa argila, usando uma teoria de mistura auto-similar; (iii) a descrição do comportamento de um grão de areia isolante capeado por uma casca de folhelho do passo anterior; e (iv) a constituição de um arenito argiloso, com base na mesma teoria de mistura auto-similar. Uma revisão e ampliação deste modelo, recentemente apresentado (LIMA et al., 2004) permite escrever a resistividade elétrica real de arenitos argilosos segundo a seguinte forma modificada da lei de Archie

$$\rho_o = \frac{\rho_w}{[1 + p(\rho_{sh} / \rho_w)^{1/m}]^m} \phi_e^{-m}, \tag{1}$$

onde ρ_w e ρ_{sh} são as resistividades da água e do folhelho, respectivamente; p é a proporção volumétrica do folhelho na matriz, ϕ_e a porosidade efetiva do arenito e m seu índice de cimentação.

Usando a mesma estrutura de capeamento por argilas molhadas e a teoria de Kozeny-Carman, LIMA e SRI NIWAS (2000) propuseram a seguinte equação para representar a permeabilidade intrínseca de um arenito argiloso

$$k = \alpha_o \left[\frac{\phi_e^{(m-1+1/q)}}{1 + \delta_c \sigma_{cs}} \right]^q, \tag{2}$$

onde α_o é uma constante geométrica de dimensão L^2 , δ_c é um parâmetro litológico que depende dos tamanhos médios da argila e da areia assim como da porosidade e condutividade elétrica do folhelho capeante. O expoente fractal q , que varia entre 2 e 3, depende da forma dos grãos de areia e do empacotamento do arenito.

As equações (1) e (2) podem ser usadas, sob condições apropriadas, para derivar as propriedades de armazenamento e de transmissão de reservatórios arenosos, sendo conhecidas suas propriedades elétricas. Exemplos de sua aplicação junto com dados de sondagens elétricas, serão mostrados no trabalho.

Resultados

As equações (1) e (2) tem sido aplicadas, satisfatoriamente, em dados de poços perfurados em aquíferos sedimentares do estado da Bahia (ROSA, 2004). A equação (2) pode também ser aplicada a dados de sondagens elétricas, usando medidas simultâneas da resistividade e do parâmetro de polarização induzida, em conjunto com os procedimentos descritos por LIMA e SRI NIWAS (2000).

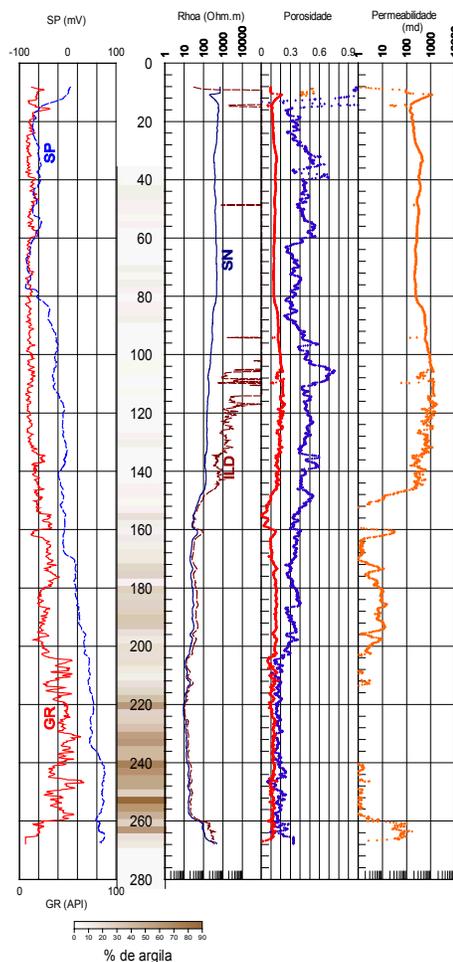


Figura 1 – Perfis geofísicos do poço de perdizes

A figura 1 contém perfis geofísicos de um poço produtor de água perfurado em arenitos do Grupo Urucuia na localidade de Perdizes, no setor oeste da bacia do rio São Francisco. Os perfis incluídos são: 1) perfil elétrico de indução e normal curto de 16" de separação; 2) perfil sônico, convertido num perfil de porosidade efetiva dos arenitos; 3) perfil de radiação gama, usado para computar a argilosidade dos arenitos, mostrada na coluna central da figura 1. A resistividade da água da formação foi medida em amostras ($\rho_w = 1650$ ohm.m) e a resistividade do filtrado da lama foi medida durante a realização da perfilagem ($\rho_{mf} = 12$ ohm.m). Valores de F e σ_{cs} foram determinados usando a equação (1), escrita para a zona lavada e para a condição virgem da formação. Valores de permeabilidade computados da equação (2), usando $\alpha_0 = 180.015$ md e $q = 2,78$ (LIMA e SRI NIWAS, 2000) são mostrados na coluna da direita na figura 1.

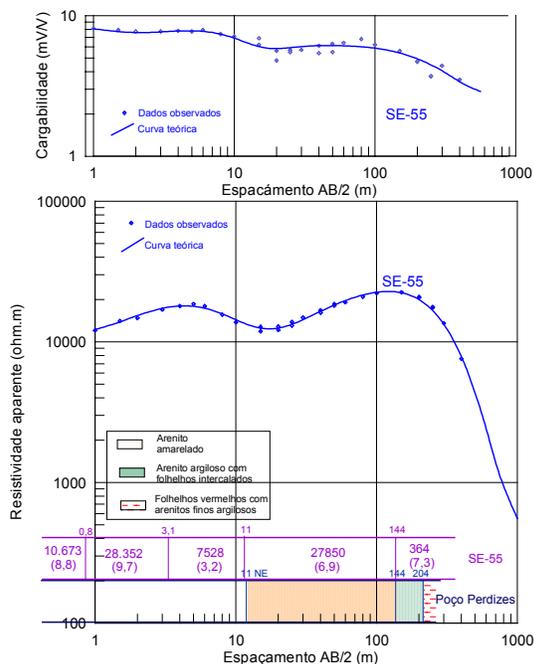


Figura 2 – Curvas da sondagem elétrica centrada no poço de Perdizes.

Na figura 2 estão mostradas as curvas da sondagem elétrica Schlumberger centrada na vizinhança do poço de Perdizes – Bahia. Essas curvas foram invertidas, para determinar a resistividade e a cargabilidade verdadeiras dos dois principais intervalos do aquífero, usando procedimentos de ajustes não-linear por mínimos quadráticos para terrenos horizontalmente estratificados (KOEFOED, 1979). Estes valores foram usados para computar F e σ_{cs} , conforme descrito em LIMA e SRI NIWAS (2000) e mostram boa concordância com os dados obtidos nas perfilagens do poço. Testes de bombeamento realizados em vários poços nesse aquífero fornecem permeabilidades médias variando entre $4,4 \times 10^{-4}$ e $9,6 \times 10^{-4}$ m/s (SRH, 2002; Lima, 2000), em muito boa correspondência com os dados petrofísicos interpretados.

Conclusões

Os resultados aqui apresentados, destacam os procedimentos teóricos que podem ser aplicados a dados de sondagens superficiais de IP-resistividade para computar valores dos principais parâmetros hidráulicos de aquíferos granulares. Eles tem sido satisfatoriamente aplicados, em primeira aproximação, para estimar características hidráulicas de aquíferos, em áreas onde são poucos ou inexistentes, dados de ensaio de bombeamento.

Agradecimentos

O autor agradece ao CPGG/UFBA pelo ambiente e suporte ao projeto e ao CNPq pelo financiamento de bolsa de pesquisa.

Referências

- FERREIRA, N. R., 1999, Inversão de dados de eletrorresistividade em meios bidimensionais. Tese de Doutorado em Geofísica, UFBA, Salvador.
- GEOTOMO SOFTWARE, 2003. Rapid 3-D resistivity & IP inversion using the least-squares method.
- GUPTA, P. K., NIWAS, S.e GAUR, V. K., 1997, Straightforward inversion of vertical electrical sounding data, *Geophysics*, **62**, 775-785.
- KOEFOED, O., 1979, *Geosounding Principles 1 – resistivity sounding measurements*, Elsevier, Amsterdam.
- LIMA, O. A. L. e SHARMA, M. M., 1990, A grain conductivity approach to shaly sands. *Geophysics*, **50**, 1347-1356.
- LIMA, O. A. L. e SHARMA, M. M., 1992, A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands. *Geophysics*, **57**, 431-440.
- LIMA, O. A. L., 2000, Estudos geológicos e geofísicos do aquífero Urucuia na bacia do Rio Cachorro, Oeste da Bahia. Relatório Técnico apresentado a SRH, Salvador.
- LIMA, O. A. L. e SRI NIWAS, 2000, Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements. *Journal of Hydrology*, **235**, 12-26.
- LIMA, O. A. L., CLENNELL, M. B., NERY, G. G., e SRI NIWAS, 2004, A volumetric approach for the resistivity response of fresh water shaly sandstones. Accepted for publication in *Geophysics*.
- MEDEIROS, W. E., 1987, Eletro-resistividade aplicada à hidrogeologia do cristalino: um problema de modelamento bidimensional. Dissertação de Mestrado em Geofísica, UFBA, Salvador.

PINHEIRO NETO, V., 2000, Modelagem estrutural-geolétrica de rochas cristalinas fraturadas. Tese de Doutorado em Geofísica, UFBA, Salvador.

PORSANI, M. J., SRI NIWAS, e FERREIRA, N. R., 2001, Robust inversion of vertical electrical sounding data using a multiple reweighted least-squares method. *Geophysical Prospecting*, **49** (2), 255-264.

ROSA, E. S., 2004, Avaliação hidrogeológica do aquífero São Sebastião na folha de Olindina, utilizando geofísica de poço e de superfície. Dissertação de Mestrado em Geofísica, UFBA, Salvador.

SEN, M. K., BHATTACHARYA, B. B., e STOFFA, P. L., 1993, Nonlinear inversion of resistivity sounding data. *Geophysics*, **58** (4), 496-507.

SRH, 2002, Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Subprojeto 3.2: Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do Rio das Fêmeas – Bahia. Relatório Final, CDROM, Superintendência de Recursos Hídricos, Bahia

ZOHDY, A. A. R., 1989, A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, **54**(2), 245-253.