



# Inversão de multiperfis verticais de IP-Resistividade obtidos ao longo de paredes rochosas

Ana C. L. Azedias/ Olivar A. L. Lima

CPGG/UFBA

## Abstract

Apparent resistivity and induced polarization Schlumberger multiprofiles were obtained along vertical cliffs cutting a shaly sandstone sequence. These measurements, designed to explore depths of about 2 m from the walls, are to be used in the petrophysical characterization of the sandstones. First, the resistivity data were one-dimensionally inverted as conventional geoelectrical soundings. Then, the apparent chargeabilities were converted to the intrinsic chargeabilities of the different media by solving a system of overdetermined linear equations, written according to Seigel's (1959) mathematical formulation. These procedures can also be applied to 2-D or 3-D earth models. The interpreted results are quite satisfactory and can be used to recognize changes in clay content and in water saturation along a profile.

## INTRODUÇÃO

Atualmente, há interesses na indústria de petróleo e no monitoramento ambiental em usar, quantitativamente, medidas de polarização induzida (IP) e de resistividade no reconhecimento e avaliação petrofísica de reservatórios areno-argilosos (Freedman e Vogiatzis, 1986). Uma das aplicações mais promissoras é a do uso de IP em poços para a estimativa da argilosidade de arenitos, principalmente em áreas onde métodos convencionais, como o de resistividade e o de raios gama, têm pouca resolução (Snyder et al., 1977; Saxena e Sibbit, 1990).

Modelos petrofísicos propostos na literatura sugerem a utilização de medidas de IP-resistividade na determinação do teor e tipo de argilas presentes nos arenitos, assim como do índice de saturação em água e da permeabilidade de reservatórios (Lima e Sharma, 1992; Lima, 1995; Lima e Dalcin, 1995). Todavia, o emprego desses modelos requer que os dados medidos em campo sejam invertidos em termos de resistividades verdadeiras e das cargabilidades intrínscas dos diferentes meios de uma estrutura geológica. Oldenburg e Li (1994), baseados no trabalho de Seigel (1959), desenvolveram técnicas de inversão de dados de polarização induzida no domínio do tempo. Partindo também da definição de Seigel (1959), propomos um procedimento de inversão genérico que pode ser aplicado a medidas efetuadas em qualquer instante da curva de decaimento do potencial elétrico. Este esquema foi aplicado, satisfatoriamente, a dados de campo obtidos como multiperfis de resistividade e cargabilidade aparentes medidos ao longo de dois cortes verticais em pacotes areno-argilosos, sub-horizontais, representativos da Formação São Sebastião, na região de Camaçari, Bahia. Foram medidos também perfis de radiação gama natural ao longo das duas linhas e coleta-

das amostras para análises granulométricas e determinação do conteúdo de argila.

## DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

O efeito de polarização induzida pode ser observado, por exemplo, no instante de desligamento de uma corrente contínua injetada num meio. Se o meio é polarizável, a voltagem no período de descarga não cai imediatamente a zero, mas para um valor finito e, então, decai quase exponencialmente a zero.

Seigel (1959) introduziu um parâmetro físico macroscópico, chamado cargabilidade, para representar todos os fenômenos microscópicos que governam a polarização elétrica. Com isso, um modelo de terra é descrito por duas quantidades: a condutividade elétrica  $\sigma(x, y, z)$  e a cargabilidade  $m(x, y, z)$ . Ambas são positivas, porém, enquanto a condutividade varia em várias ordens de grandeza, a cargabilidade está confinada à região (0,1).

Se um meio é composto de  $n$  diferentes materiais de condutividades  $\sigma_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , então, o potencial primário, na ausência de efeitos de IP, pode ser expresso como  $\Phi = \Phi(\sigma_i)$ . Este é o potencial 'instantâneo' presente quando a corrente é ligada. Se o meio é polarizável, então, o potencial  $\Phi'$ , medido algum tempo após o início da injeção de corrente, irá diferir de  $\Phi$ . A função será  $\Phi' = \Phi(\sigma'_i)$ , onde  $\sigma'_i = \sigma_i(1 - m_i)$  e  $m_i$  são as cargabilidades intrínscas dos vários meios.

A cargabilidade aparente teórica para o meio é definida pela razão do potencial secundário  $\Phi_s$ , medido imediatamente após a interrupção da corrente, pelo potencial de estado estacionário  $\Phi'$  medido pouco antes da corrente ser desligada (Seigel, 1959):

$$M_a = \frac{\Phi_s}{\Phi'} = \frac{(\Phi' - \Phi)}{\Phi'} \quad (1)$$

Como a dependência do potencial elétrico com a condutividade é não linear, a expressão do potencial  $\Phi'$  é bastante complicada. Entretanto, tomando a aproximação de primeira ordem em termos de uma expansão em série de Taylor em torno de  $\sigma$  e considerando que  $m_i \ll 1$ , para todos os  $i$ , Seigel (1959) obteve:

$$M_a = \sum_{i=1}^n m_i B_i, \quad \sum_{i=1}^n B_i = 1 \quad (2)$$

Isto é, a cargabilidade aparente total ( $M_a$ ) pode ser obtida por uma soma ponderada das cargabilidades intrínscas ( $m_i$ ) dos vários meios. Para uma subsuperfície composta de  $n$  diferentes materiais de resistividades  $\rho_i$ , os coeficientes  $B_i$  são obtidos como:

$$B_i = \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i} = \frac{\rho_i}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_i} \quad (3)$$

ou, através de uma aproximação em termos de diferenças finitas (Nabighian et al, 1976):

$$B_i \approx \frac{\rho_i \Delta \rho_a}{\rho_a \Delta \rho_i}, \quad (4)$$

As equações (2) a (4) indicam que o efeito de polarização induzida depende da cargabilidade de um material, de sua resistividade e da resistividade das rochas encaixantes. Elas não se restringem a camadas horizontais, sendo válidas para qualquer modelo de terra (Seigel, 1959, Nabighian et al, 1976).

Um procedimento para a determinação dos coeficientes  $B_i$  de cada meio reduz-se aos seguintes passos:

(1) Inversão dos dados de resistividades aparentes para obtenção de um modelo estrutural com as resistividades verdadeiras dos diferentes meios.

(2) Cálculo dos coeficientes  $B_i$  a partir das variações nas resistividades aparentes causadas por pequenas perturbações nas resistividades verdadeiras do modelo.

Uma vez que os coeficientes de polarização induzida  $B_i$  e a cargabilidade aparente  $M_{aj}$  são conhecidas, as cargabilidades intrínsecas podem ser obtidas através da resolução, pelo método dos mínimos quadrados, do sistema de equações lineares sobredeterminado:

$$\mathbf{M}_a = \mathbf{Bm} \quad (5)$$

onde  $\mathbf{B}$  é uma matriz  $k \times n$ ,  $k \geq n$ , contendo os coeficientes  $B_{ji}$ ,  $j = 1..k$ ,  $i = 1..n$ ,  $k$  é o número de observações,  $n$  o número de camadas (ou de blocos no caso das inversões 2-D, 3-D) do modelo.  $\mathbf{M}_a$  é o vetor ( $k \times 1$ ) de dados observados. A solução procurada é o vetor  $\mathbf{m}$  ( $n \times 1$ ) contendo os valores das cargabilidades intrínsecas.

A cargabilidade aparente teórica não pode ser medida precisamente no campo, uma vez que efeitos indutivos e de acoplamento eletromagnético mascaram a resposta do meio no instante do desligamento da corrente. As medidas são feitas com um pequeno atraso, quando estes efeitos tornam-se desprezíveis. O procedimento aqui desenvolvido aplica-se a dados obtidos na prática, supondo que os valores observados de  $M_a$  sejam aproximações satisfatórias dos valores teóricos.

## DADOS DE CAMPO

Dois perfis geoeletricos foram levantados em afloramentos de cortes verticais na Formação São Sebastião na região de Camaçari, Bahia, que representam frentes de exploração de materiais de uso na construção civil. As medidas de  $\rho_a$  e  $M_a$  foram obtidas usando um arranjo Schlumberger de eletrodos em mini-sondagens, com cinco espaçamentos entre os eletrodos de corrente ( $AB$ ) variando de 0.90 a 4m, e com um espaçamento fixo entre os eletrodos de potencial de 0.30m. Essas sondagens foram equi-espaçadas de 0.40m de distância na linha 1 e de 0.20m na linha 2. Para otimização de aquisição de dados, foi utilizado um sistema de multi-eletrodos e multi-cabos com caixa de interligação conectada ao equipamento. Esta aquisição foi realizada com suporte de ferramentas de alpinismo (Figura 1).

O equipamento utilizado foi um sistema SYSCAL modelo R2 que mede, simultaneamente, a resistividade aparente, as cargabilidades aparentes médias observadas em quatro janelas de tempo e uma média ponderada desses valores. O período de injeção de corrente contínua na terra foi de

2000ms, com retardo de leitura de potencial de 1260ms e de cargabilidade de 160ms, com janelas de 120, 220, 420 e 820ms.

Para evitar-se a polarização dos eletrodos de medidas de potencial elétrico, estes foram acondicionados em pequenos tubos de PVC, em forma de L, contendo solução supersaturada de sulfato de cobre e com bases de gesso, material poroso e permeável, não polarizável.

A Figura 2 mostra as pseudoseções de resistividade e cargabilidade aparentes obtidas na linha 1, que contém 20 mini-sondagens elétricas. Esses resultados foram interpretados usando modelos uni-dimensionais de terra ( $\rho = \rho(z)$  e  $m = m(z)$ ), primeiramente, invertendo-se para as resistividades verdadeiras e, em seguida, para as cargabilidades intrínsecas do meio estratificado usando os procedimentos descritos.

Alguns valores de IP negativos foram observados nos dados de campo, que são devido à presença de material com contrastes de resistividade em torno de uma região polarizável ou a efeitos espúrios de correntes telúricas e acoplamentos eletromagnéticos. Como o número de valores positivos é muito maior do que o de negativos, desprezamos os últimos em nossa interpretação.

Na Figura 3, faz-se a comparação entre as pseudoseções observadas e calculadas para a mesma linha 1, com base nos modelos uni-dimensionais ajustados. A comparação mostra que os resultados são satisfatórios, embora deva ser considerada uma inversão 2-D numa análise mais detalhada. Na inversão 2-D, um modelo de blocos paralelos ( $\rho_i, m_i$ ) representaria as camadas sub-horizontais de arenitos com diferentes conteúdos argilosos e com índice de umidade aumentando gradativamente para o interior do afloramento.

As variações de resistividade observadas em cada mini-sondagem e delineadas nas pseudoseções refletem variações de umidade na seção, sendo que os aumentos de saturação refletem-se tanto por uma diminuição nos valores de  $\rho_a$ , quanto por um aumento nos valores de  $M_a$ . Na vertical, a estratificação da formação é enfatizada por variações de  $\rho_a$  e de  $M_a$ . A quantificação desses parâmetros usando modelos petrofísicos constará de uma ampliação deste trabalho.

## CONCLUSÕES

Dados de multiperfilagens de polarização induzida e de resistividade no domínio do tempo são usados para fazer uma caracterização petrofísica, em mesoescala, de alguns pacotes arenosos da Formação São Sebastião, na região de Camaçari, BA. Tal formação constitui um dos melhores reservatórios de água subterrânea do Estado.

Os dados foram interpretados usando uma geometria de camadas, em combinação com procedimentos integrados de inversão linear por mínimos quadráticos. Os modelos obtidos são descritos em termos de variações granulométricas, teores de umidade e proporções de argila ao longo de seções verticais dos afloramentos.

## REFERÊNCIAS

- Freedman, R. e Vogiatzis, J.P., 1986, *Theory of induced-polarization logging in a borehole: Geophysics*, 51, 1830-1849.
- Lima, O.A.L. e Sharma, M.M., 1992, *A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in*

*shaly sands: Geophysics, 57, 1689 - 1702.*

*Lima, O.A.L., 1995, Water saturation and permeability from resistivity, dielectric and porosity logs: Geophysics, 60, 1756 -1764.*

*Lima, O.A.L. e Dalcin, C.L.R., 1995, Application of a new shaly sand model for interpreting resistivity and dielectric log measurements: The Log Analyst, March-April, 29-41*

*Saxena, V. e Sibbit, A.M., 1990, Deep saturation in low salinity reservoirs from dual laterolog quadrature signals: SPE 20560, 309-320*

*Seigel, H.O., 1959, Mathematical formulation and type curves for induced polarization: Geophysics, 24, 547-565*

*Snyder, D.D., Merkel, R.H. e Williams, J.T., 1977, Complex formation resistivity - the forgotten half of the resistivity log: SPWLA eighteenth Annual Logging Symposium, June 5 - 8, 39 p.*

*Oldenburg, D.W. e Li, Y., 1994, Inversion of induced polarization data: Geophysics, 59, 1327 -1341*

*Nabighian, M.N. e Elliot, C.L., 1976, Negative induced polarization effects from layered media: Geophysics, 41, 1236 - 1255*

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a M. Porsani, H. Sato, L. Batista, A. Santos e N. Ferreira pela ajuda em programação e frutíferas discussões. L. Lisboa, D. Bittencourt Jr., J. Paz e ao Corpo de Bombeiros de Salvador (BA), pelo precioso auxílio na obtenção de dados de campo. Ao CNPq pela concessão de bolsa de Mestrado e de Produtividade em Pesquisa.

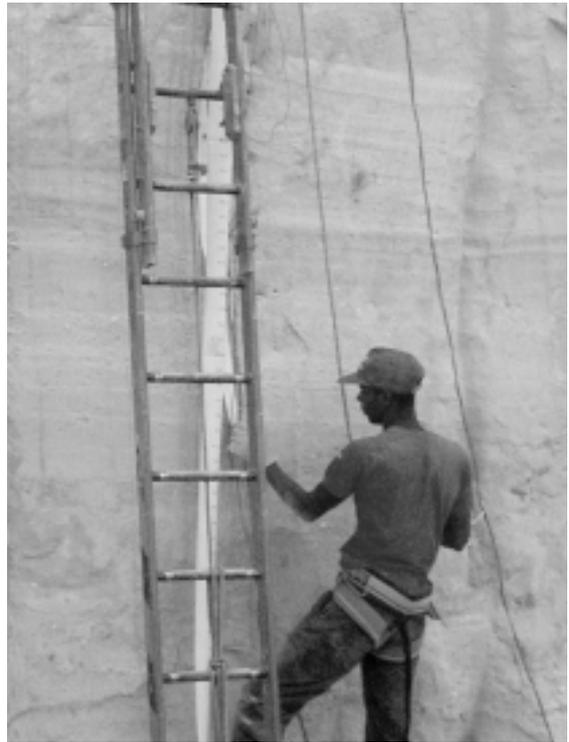


Figura 1: Aquisição vertical de dados de IP-resistividade ao longo de uma parede rochosa sedimentar. Para a fixação dos eletrodos o operador utilizou escada e equipamento de alpinismo

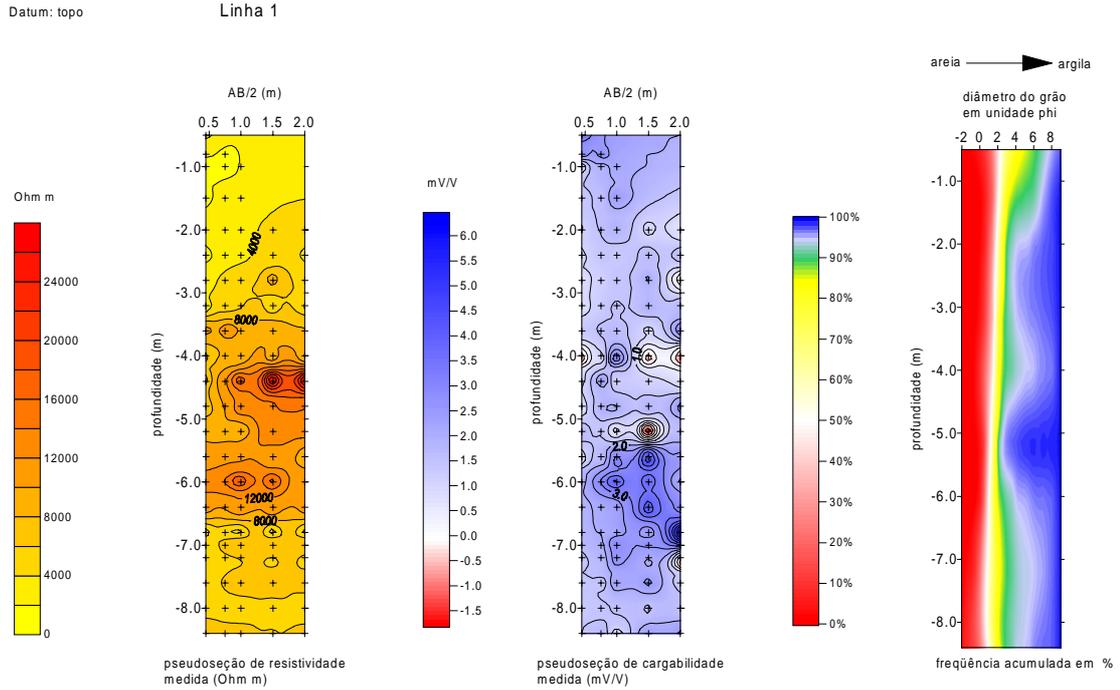


Figura 2: Pseudoseções de resistividade elétrica e de cargabilidade medidas e distribuição granulométrica de sedimentos em freqüência acumulada da Linha 1 (Formação São Sebastião).

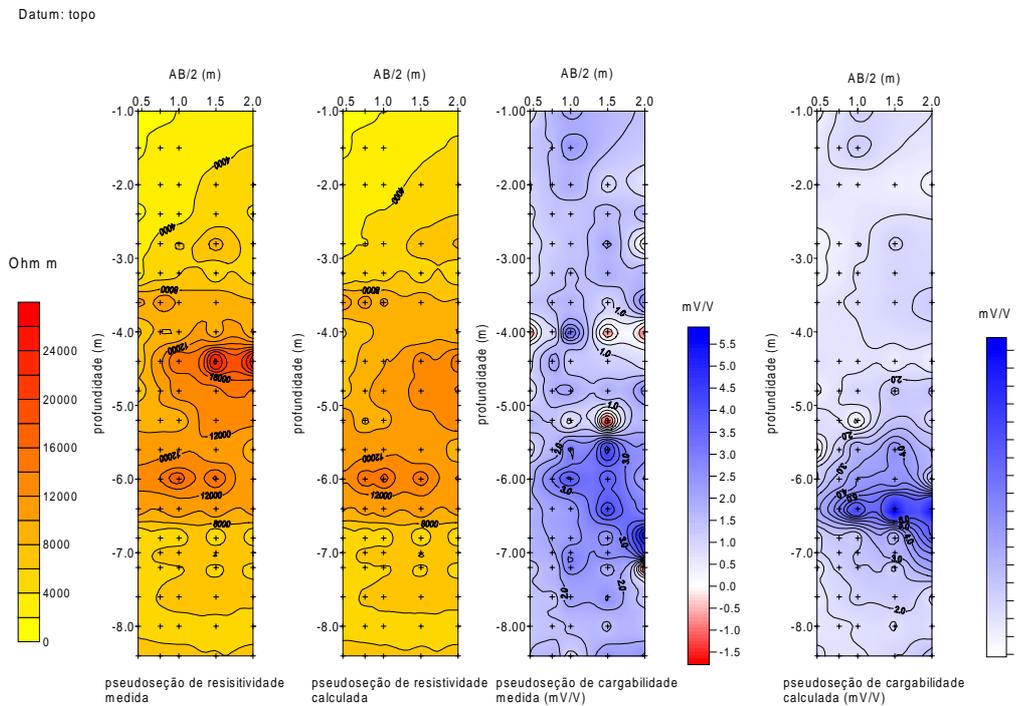


Figura 3: Pseudoseções medidas e calculadas de resistividade elétrica e de cargabilidade da Linha 1 (Formação São Sebastião).