



LOCALIZAÇÃO DE CAMADAS CONDUTORAS COM ARRANJO DIPOLO-DIPOLO MAGNÉTICO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.

Licurgo P. de Brito & Marcos W. Correa Silva

Departamento de Física - Universidade Federal do Pará – Brasil

ABSTRACT

A method to localize conductive layers in a horizontally stratified media is presented in this paper. A loop-loop system is assumed to stay on the earth surface, here modeled as a conductive half-space hosting a more conductive layer as inhomogeneity. The transmitter is a vertical magnetic dipole and the receiver can measure both vertical and horizontal magnetic field components (H_z and H_r , respectively) in the frequency domain.

The influence of the inhomogeneity on the magnetic field has been calculated through a detectability function Δ . Using the parameters related to the extremals of Δ and their analysis of stability under variations of size and conductivity contrast, it was possible to find the position of the inhomogeneity's center corresponding to the maximum influence in the measurements. Such a position is defined as *main zone* center. Best results were obtained through H_r amplitude.

The main zone center was found to be $p_o = 0.16 r$, where r is the transmitter-receiver separation. Using this result, it was drawn a plot of maximum values of Δ , calculated through H_r amplitude, versus p_o . Such plot indicates the conductivity distribution in a 1D earth, and the extremals of the curve correspond to the center of the more conductive layers. The maximum error in this method is about 30 %. The curves so drawn can be very helpful to electromagnetic data interpretation because they are very similar to the well-known apparent resistivity curves, largely used for electric and magnetotelluric interpretation methods.

INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é estabelecer um conjunto de procedimentos para obter, com razoável precisão, as profundidades de camadas condutivas, a partir de medidas do campo produzido por um dipolo magnético, na superfície de um meio horizontalmente estratificado. Este problema está fortemente relacionado com a obtenção da profundidade em que deve-se encontrar uma camada condutora, para que sua influência nas medidas de campo magnético seja máxima, quando obtidas na superfície de um semi-espaço homogêneo, contendo essa camada como única heterogeneidade.

A localização da região que mais influencia em medidas elétricas e eletromagnéticas tem sido objeto de estudo desde Evjen (1938) até os dias atuais. No entanto, não é possível obter nenhuma regra geral, uma vez que a posição de tal região depende do sistema eletromagnético, da configuração transmissor-receptor, e das propriedades físicas e geométricas do meio. Em aplicações práticas tem sido usadas regras empíricas como a de Hallof (1957) para o arranjo dipolo-dipolo elétrico. Por outro lado, estudos teóricos como os de Evjen (1938), Roy e Apparao (1971) para medidas elétricas e o de Sato (1979) para medidas eletromagnéticas, localizam um ponto ou uma profundidade responsável pela máxima contribuição para o sinal obtido, mas sempre considerando que as medidas sejam obtidas na superfície de um semi-espaço homogêneo. Neste trabalho é utilizada a abordagem de Brito (1994), que considera que a região de maior influência em medidas eletromagnéticas (*zona principal*) é aquela em que uma heterogeneidade condutora deve estar posicionada, no interior de um semi-espaço homogêneo, para que sua influência nas medidas seja máxima. Essa abordagem tem se mostrado adequada, tanto para métodos elétricos (Braga & Brito, 1997) quanto para métodos eletromagnéticos (Brito & Dias, 1995).

O modelo adotado neste trabalho consiste de um semi-espaço infinito de condutividade σ_1 , contendo uma heterogeneidade unidimensional de condutividade σ_2 e espessura e , cujo centro encontra-se a uma profundidade p . O sistema eletromagnético possui um dipolo magnético vertical como transmissor e dois dipolos magnéticos receptores, um horizontal e outro vertical, posicionados na superfície do semi-espaço (ver Figura 1).

MEDIDA DA INFLUÊNCIA DA HETEROGENEIDADE

Para medir a influência de uma heterogeneidade nos valores do campo magnético na superfície da Terra, modelada aqui como um semi-espaço condutor, foi utilizada a função Detetabilidade Δ apresentada por Brito (1994) e Brito & Dias (1995), definida como

$$\Delta = \frac{St - Sp}{Sp_{\max}} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

onde Sp (Sinal Primário) é o sinal medido no receptor quando o semi-espaço é homogêneo ($\sigma_2 = \sigma_1$); St (Sinal total) é o sinal medido no receptor quando houver uma heterogeneidade no interior do semi-espaço ($\sigma_2 \neq \sigma_1$) e, Sp_{\max} (Sinal primário máximo) é um valor fixo dado pelo máximo da função Sp .

A simetria cilíndrica do modelo e da fonte permitem usar apenas duas componentes para representar o campo magnético obtido no receptor: a componente radial Hr e a componente axial H_z (Figura 1). Dado que para cada componente pode-se medir amplitude e fase, a equação (1) pode ser aplicada em quatro situações distintas: Δ_{IHr} - função detetabilidade calculada para amplitude de Hr , $\Delta_{\Phi Hr}$ - função detetabilidade calculada para fase de Hr , Δ_{IH_z} - função detetabilidade calculada para amplitude de H_z , $\Delta_{\Phi H_z}$ - função detetabilidade calculada para fase de H_z .

Os valores de St na equação (1) são dados pelas componentes do campo produzido por um dipolo magnético vertical, na superfície de um semi-espaco horizontalmente estratificado. Essas componentes são calculadas através das equações (Ward & Hohmann, 1987)

$$Hr = \frac{m}{4\pi} \int_0^{\infty} [e^{-uoz} - r_{TE} e^{uoz}] \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda \quad \text{e} \quad H_z = \frac{m}{4\pi} \int_0^{\infty} [e^{-uoz} + r_{TE} e^{uoz}] \frac{\lambda^3}{u_o} J_{01}(\lambda r) d\lambda \quad , \quad (2)$$

em que r e z são as coordenadas cilíndricas do ponto onde se calcula o campo, $r_{TE} = (\lambda - \hat{u}_1)/(\lambda + \hat{u}_1)$, $\hat{u}_n = u_n [\hat{u}_{n+1} + u_n \tanh(u_n h_n)] / [u_n + \hat{u}_{n+1} \tanh(u_n h_n)]$, $u_n = (\lambda^2 - k_n^2)^{1/2}$, $k_n^2 = \omega \mu_n (\omega \epsilon_n - i \sigma_n)$ e para a última camada (camada N) $\hat{u}_N = u_N$. As integrais das equações (2) foram resolvidas numericamente através de filtros digitais lineares para as transformadas de Hankel, segundo de Guptasarma & Singh (1997).

Os valores de Sp na equação (1) podem ser obtidos resolvendo-se analiticamente as integrais que aparecem nas equações (2) para o caso particular de uma só camada (Ward & Hohmann, 1987).

PROFUNDIDADE DA ZONA PRINCIPAL

As grandezas que caracterizam o modelo em estudo são r - separação transmissor-receptor, p - profundidade do centro da heterogeneidade, e - espessura da heterogeneidade, σ_1 - condutividade do semi-espaco, σ_2 - condutividade da heterogeneidade e ω - frequência angular da corrente no dipolo magnético transmissor. Para melhor representar a função Δ , é conveniente agrupar as seis grandezas acima em quatro parâmetros adimensionais: r/p , e/p , σ_2/σ_1 e p/δ , onde δ é o "skin depth" de uma onda plana num meio homogêneo de condutividade σ_1 ($\delta = \sqrt{2/\omega \mu \sigma_1}$).

Para exemplificar, mostra-se a Figura 2 com Δ_{IHr} em função de r/p e p/δ , para um caso particular de pequena contribuição da heterogeneidade: $e/p = 0,1$ e $\sigma_2/\sigma_1 = 5$. Note-se que extremos da função Δ_{IHr} , indicando máxima influência da heterogeneidade nas medidas, podem ser localizados pelos pares de coordenadas (r/p , p/δ). A existência de extremos positivos e negativos nos obriga a estudá-los independentemente, porém, levando em consideração que ambos nos conduzem a uma única estimativa para a profundidade procurada. No entanto, a multiplicidade de extremos de um mesmo sinal indica ambigüidade, o que nos faz descartá-los para evitar que cheguemos ao absurdo de obter mais de um valor de profundidade para um único corpo. Por outro lado, extremos secundários com módulos de Δ inferiores a 5% não foram considerados, por estarem dentro da faixa de ruído comumente aceita em dados de campo.

Conhecendo-se os valores numéricos das coordenadas (r/p , p/δ) de um extremo de Δ , é possível obter, para cada par (r, ω) conhecido, a profundidade p_0 em que a heterogeneidade mais influencia nas medidas, tanto através de r/p quanto de p/δ ($= p \sqrt{\omega \mu \sigma_1 / 2}$). No entanto, a obtenção dos valores numéricos dessas coordenadas fica dificultada pela variação que eles sofrem sob influência da espessura da heterogeneidade (e/p) e do contraste de condutividade (σ_2/σ_1). Fazendo-se um estudo dos extremos positivos e negativos de Δ_{IHr} , $\Delta_{\Phi Hr}$, Δ_{IH_z} e $\Delta_{\Phi H_z}$, com $0,1 \leq e/p \leq 1,9$ e $5 \leq \sigma_2/\sigma_1 \leq 1000$, descartando-se os que apresentam multiplicidade e/ou possuem valores inferiores a 5%, verifica-se que as coordenadas do pico positivo de Δ_{IHr} apresentam as menores variações com espessura e condutividade da heterogeneidade, sendo portanto as mais indicadas para fornecer estimativas da profundidade p_0 . A Figura 3 mostra as variações dos valores de r/p e p/δ , associados ao pico positivo de Δ_{IHr} , em função de e/p e de σ_2/σ_1 . A partir dos dados apresentados nessa figura, verifica-se que r/p varia entre 4,6 e 8,8, com valor médio 6,7 e desvio máximo em relação a esse valor sendo 31%. Da mesma figura obtém-se p/δ variando entre 0,05 e 0,38, com valor médio 0,21 e desvio máximo em relação a esse valor sendo 77%. Portanto, o parâmetro r/p é mais indicado para fornecer estimativas da profundidade da zona principal do que o parâmetro p/δ . Note-se que tanto os valores de r/p quanto os de p/δ , são mais sensíveis às variações do contraste de condutividade do que da espessura da heterogeneidade, portanto, os extremos dos intervalos de variação desses parâmetros são determinados pelo contraste de condutividade. É relevante também observar que os valores de r/p são praticamente invariantes com a espessura da heterogeneidade.

A profundidade p_0 da zona principal será então obtida a partir do valor médio de r/p , resultando em **$p_0 = 0,16r$** . Isto significa que para uma dada separação transmissor-receptor r , p_0 será o valor de profundidade do centro de uma camada condutora, em que ela produz a máxima influência nas medidas.

PROCEDIMENTO PARA LOCALIZAÇÃO DE CAMADAS CONDUTORAS

A profundidade da zona principal $p_0 = 0,16r$ foi obtida com um erro máximo da ordem de 30%, correspondente aos valores extremos do intervalo de variação de r/p . Assim sendo, para cada separação transmissor-receptor (r), é possível associar, além da profundidade p_0 , o máximo da função Δ_{IHr} calculada em todo o espectro de frequência ω . Tal associação nos fornece uma curva de extremos positivos de Δ_{IHr} em função de p . Essa curva indica a distribuição de condutividade em subsuperfície e, através de seu(s) extremo(s), fornece também uma boa estimativa de profundidade de camadas condutoras. Na Figura 4 representam-se três curvas obtidas para um modelo de um semi-espaco contendo uma camada condutora com contrastes de condutividade (σ_2/σ_1) iguais a 5, 100 e 1000. Os símbolos (⊗) indicam os extremos de cada curva, fornecendo estimativas para a profundidade do centro da camada condutora. Note que, como era de se esperar devido à própria construção do método, se o contraste de condutividade estiver próximo dos limites do intervalo estudado (5 e 1000), o erro na estimativa da profundidade da heterogeneidade é maior, porém, para condutividades mais próximas do centro desse intervalo, a estimativa da profundidade é bem mais precisa (linha cheia).

Para obter gráficos dos extremos de Δ_{HH} em função da profundidade, como na Figura 4, segue-se basicamente as seguintes etapas:

- 1) Define-se um conjunto de separações transmissor-receptor (r) e um largo espectro de freqüência (ω) em que serão feitos os cálculos, no caso de modelagem, ou feitas as medidas, no caso de dados reais.
- 2) Faz-se uma estimativa da condutividade do semi-espaço homogêneo para cálculo do Sinal Primário (S_p) para cada par (r, ω) definido no item 1. Neste caso, como estamos trabalhando com modelagem, o valor de σ_1 foi considerado conhecido e igual ao do modelo. Porém, no caso de um trabalho de campo, o valor de σ_1 pode ser estimado através de medidas com alta freqüência ou a partir de outros métodos, como informação *a priori*.
- 3) Obtém-se os valores do Sinal Total (S_t) para cada par (r, ω) definido no item 1. Neste caso de modelagem, isto é feito através das equações (2). No caso de dados reais, o Sinal Total é a própria medida de campo magnético obtida no receptor.
- 4) Calcula-se a função Δ_{HH} através da equação (1) e, para cada r , seleciona-se o máximo valor de Δ_{HH} .
- 5) O valor máximo obtido no item anterior é associado a uma profundidade $p_o = 0,16r$. Traça-se então o gráfico.

CONCLUSÕES

Com o método aplicado neste trabalho foi possível localizar o centro de camadas condutoras, em meios horizontalmente estratificados, com erro máximo da ordem de 30 %. Na maioria das situações práticas o contraste de condutividade fica próximo do centro do intervalo aqui estudado e, nesse caso, o erro produzido por este método torna-se significativamente menor.

O valor obtido para a profundidade da zona principal ($p_o = 0,16 r$), difere daquele obtido por Sato (1979) ($p_o = 0,5 r$) na mesma condição de dipolo-dipolo magnético em acoplamento mínimo. Essa diferença é certamente devida à abordagem de camada condutora no interior de um semi-espaço utilizada neste trabalho, em oposição à de semi-espaço homogêneo utilizada por Sato.

A curva de extremos de Δ_{HH} em função de profundidade, obtida neste trabalho, pode vir a ser de grande utilidade na interpretação de dados eletromagnéticos. Nota-se uma grande semelhança entre essa curva e a de resistividade aparente largamente utilizada em métodos elétricos e magnetotélúrico.

REFERÊNCIAS

- Evjen, H.M., 1938. Depth factor and resolving power of electrical measurements. *Geophysics*, 3: 78-95.
- Braga, L.C., Brito, L.P., 1997. Região de maior influência em medidas geoeletricas com arranjo Schlumberger: modelo unidimensional. V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, setembro/outubro/97, São Paulo - SP.
- Bruto, L.P., 1994. Região do espaço que mais influencia em medidas eletromagnéticas no domínio da freqüência: caso de uma linha de corrente sobre um semi-espaço condutor. Belém, Universidade Federal do Pará. 128 p. Tese (Doutorado em Geofísica) – Curso de Pós-graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1994.
- Bruto, L.P., Dias, C.A., 1995. Região do espaço que mais influencia em medidas eletromagnéticas no domínio da freqüência, para uma linha de corrente sobre um semi-espaço condutor: modelo bidimensional. IV Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, agosto/95, Rio de Janeiro - RJ.
- Guptasarma, D. & Singh, B., 1997. New digital linear filters for Hankel J_0 and J_1 transforms. *Geophysical Prospecting*, 45, 745-762.
- Hallof, P.G., 1957. On the interpretation of resistivity and induced polarization results. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology. 182p. Ph.D. thesis – Department of Geology and Geophysics. MIT, 1957
- Roy, A. & Apparao, A., 1971. Depth of investigation in direct-current methods. *Geophysics*, 36: 943-959.
- Sato, H.K., 1979. Método eletromagnético para interpretação de polarização induzida e resistividade, usando o protótipo de um sistema de multi-freqüência. Salvador, Universidade Federal da Bahia. 95p. Tese (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Geofísica, UFBa, 1979.
- Ward, S.H. & Hohmann, G.W., 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications. In: Nabighian, M.N. ed. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Tulsa. SEG. v. 1. P. 131-311.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Física da Universidade Federal do Pará (UFPA), pela liberação parcial de carga horária do primeiro autor para pesquisa e, ao Colegiado do Curso de Física dessa Universidade, pela paciente tolerância em dilatar os prazos para entrega do Trabalho de Conclusão de Curso do segundo autor, que resultou neste trabalho. Agradecemos também à indispensável disponibilidade de recursos computacionais do PRONEX/UNICAMP/Engenharia de Reservatório, que apoia pesquisadores da UFPA como grupo emergente.

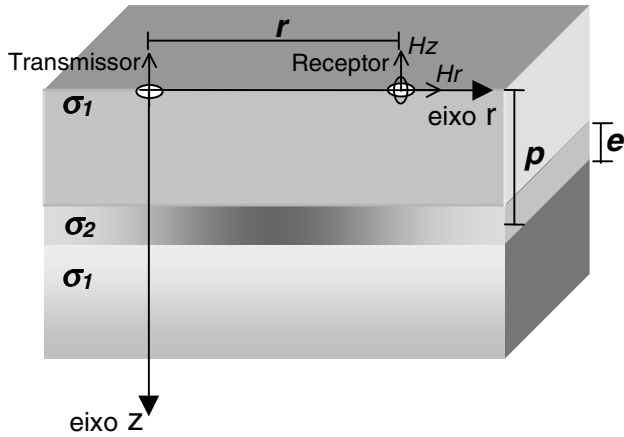


Figura 1: Modelo unidimensional e sistema dipolo-dipolo magnético (loop-loop system).

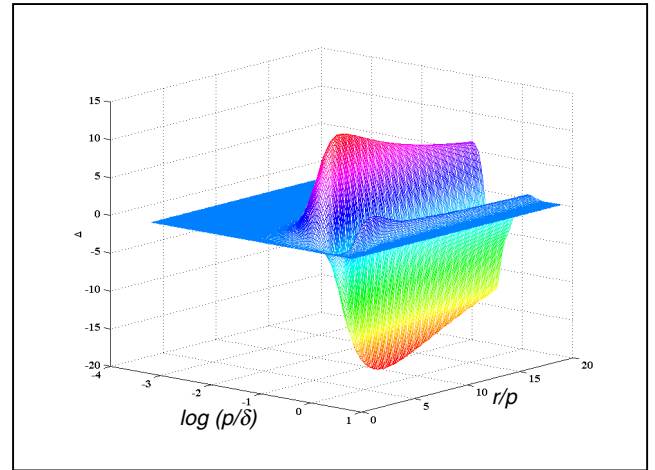


Figura 2: Representação de Δ_{IHrI} em função de r/p e p/δ , com $\sigma_2/\sigma_1 = 5$ e $e/p = 0,1$.

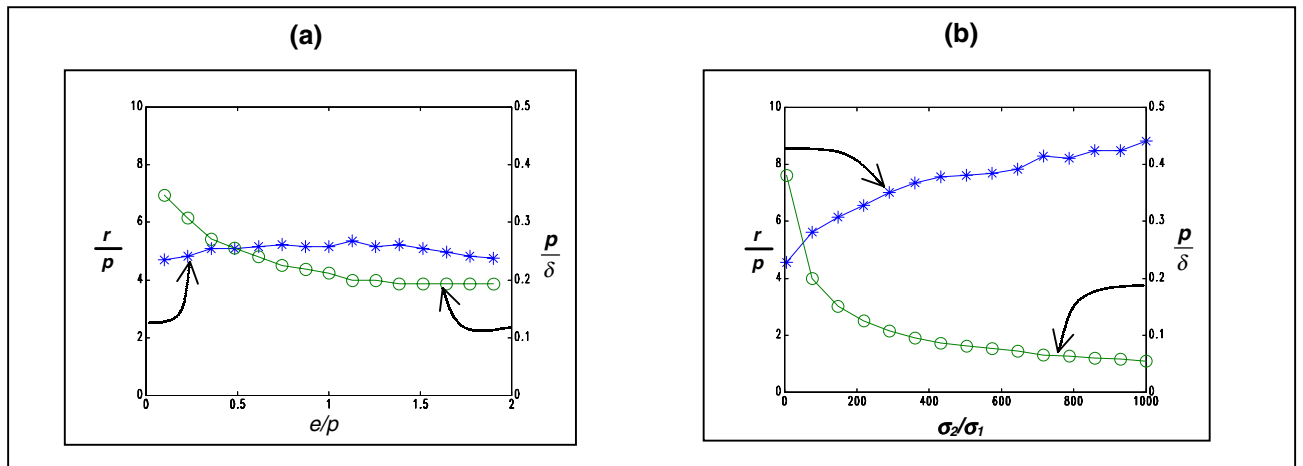


Figura 3: valores das coordenadas r/p (eixo da esquerda) e p/δ (eixo da direita) dos picos positivos de Δ_{IHrI} , em função de (a) e/p ; (b) σ_2/σ_1 .

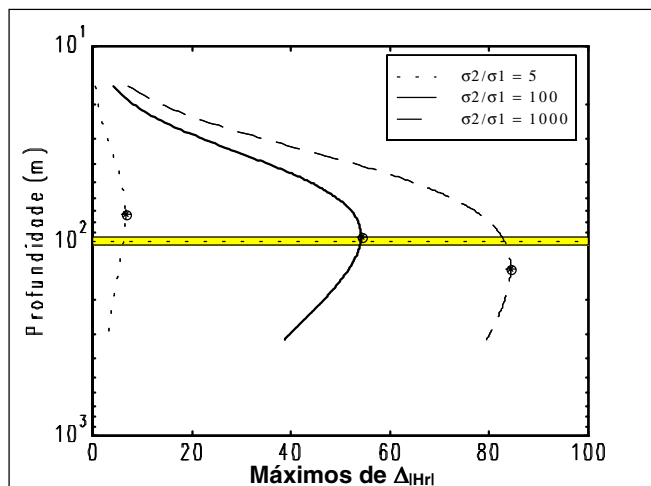


Figura 4: Picos positivos de Δ_{IHrI} em função de $p_0 = 0,16r$. A camada condutora (região sombreada) tem seu centro a 100 m de profundidade e $e/p = 0,1$. A condutividade do meio encaixante é 0,01 S/m e cada curva corresponde a um contraste de condutividade indicado na legenda.