



Modelamento de dados eletromagnéticos (EM) e sua correlação com dados de eletrorresistividade (ER) em um estudo de investigação rasa

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo

Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT
gandolfo@ipt.br
Instituto de Geociências - USP

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGF, 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

Este trabalho apresenta um exemplo da utilização de uma técnica de modelamento direto de dados eletromagnéticos (EM) e a correlação do resultado com uma seção modelada 2D de eletrorresistividade (ER) obtida através de um programa de inversão por suavização. A aquisição de dados foi efetuada sobre um perfil de 40 m de extensão em um estudo de caso cujo objetivo era uma investigação hidrogeológica rasa (menos de 3 metros de profundidade).

1. Introdução

Os métodos elétricos e eletromagnéticos são largamente utilizados em estudos hidrogeológicos e na identificação e mapeamento de determinadas plumas de contaminação, uma vez que o parâmetro físico por eles investigado (condutividade elétrica, σ , ou o seu inverso, a resistividade, $\rho=1/\sigma$) respondem bem à presença de água nas formações e à alguns tipos de contaminantes em subsuperfície, seja no solo ou na água subterrânea.

Sendo a mesma grandeza física investigada pelos dois métodos, é de se esperar que os resultados obtidos dos levantamentos onde ambos são empregados de uma forma conjunta, possam ser diretamente correlacionados.

Atualmente, técnicas de inversão 2D de dados de eletrorresistividade possibilitam quantificações, permitindo a determinação mais precisa da distribuição das resistividades verdadeiras em subsuperfície, assim como das profundidades relacionadas quando disponíveis informações diretas ou um bom conhecimento geológico local.

Por sua vez, os dados de um levantamento EM podem também ser quantificados através de técnicas de modelamento direto e, conseqüentemente, correlacionados com seções modeladas 2D de eletrorresistividade obtidas por processos de inversão.

2. O método eletromagnético (EM): princípios

Os métodos eletromagnéticos baseiam-se na medida da condutividade elétrica ou parâmetros a ela relacionados dos materiais em subsuperfície, utilizando-se campos eletromagnéticos induzidos no terreno e gerados por correntes alternadas de origem artificial ou natural.

A condutividade elétrica é expressa em unidades de Siemens por metro (S/m). As profundidades investigadas pelos métodos EM são inversamente proporcionais às frequências empregadas.

O princípio do método é extremamente simples, baseado nas conhecidas Leis de Ampère e de Faraday.

Consideremos uma bobina transmissora (Tx) energizada com uma corrente alternada e colocada sobre um terreno (assumido como uniforme) e uma bobina receptora (Rx).

A oscilação temporal do campo magnético causada pela corrente alternada na bobina transmissora provoca uma indução de correntes no subsolo. Estas correntes, por sua vez, geram um campo magnético secundário (H_s) que é captado, juntamente com o campo primário (H_p) na bobina receptora.

Os parâmetros medidos pelos sistemas EM são função destes campos, como por exemplo, o vetor resultante H_r (Figura 1).

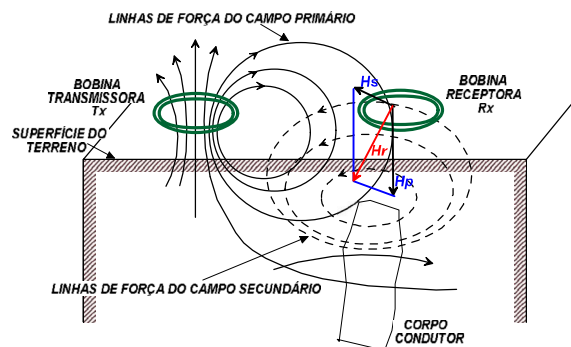


Figura 1 - Ilustração simplificada de um sistema eletromagnético de prospecção.

2.1 Equipamento

O equipamento utilizado neste trabalho foi o sistema EM-31 (Geonics). Trata-se de um equipamento eletromagnético que usa como fonte do campo primário um transmissor que opera com uma frequência igual a 9,8 KHz, medindo diretamente a condutividade elétrica aparente em unidades de mS/m (mmho/m). O espaçamento entre as bobinas Tx e Rx é fixo (aproximadamente 3,7m).

O campo magnético secundário, uma complexa função da distância entre bobinas (s), da frequência de operação (f) e da condutividade elétrica do terreno, torna-se uma função simples destas variáveis sob certas restrições, tecnicamente definidas como "operação sob baixos valores de número de indução" (McNEILL, 1980), dada pela eq.(1).

$$\frac{H_s}{H_p} \cong \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4} \quad (\text{eq.1})$$

onde ω (frequência angular) = $2\pi f$

$$i = \sqrt{-1}$$

μ_0 = permeabilidade magnética do espaço livre

Desta forma, a razão entre o campo magnético secundário e o primário fica linearmente proporcional à condutividade do terreno, tornando possível a leitura direta das condutividades aparentes (σ_{ap}) medindo-se a relação dada pela eq (2).

$$\sigma_{ap} = \frac{4}{2\pi f\mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (\text{eq.2})$$

Os resultados apresentados neste trabalho correspondem à aquisição de dados com o eixo-dipolo na posição horizontal, uma das duas possíveis formas de aquisição de dados em campo com este equipamento.

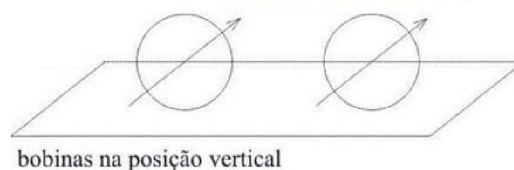
No momento da medida, sob esta configuração, as bobinas estão dispostas verticalmente (Figura 2) e a profundidade de investigação (que está relacionada com a distância entre as bobinas e a disposição das bobinas no momento da medida) equivale a aproximadamente 0,75 vezes a distância entre os eixos-dipolos.

No caso do EM-31 (espaçamento entre bobinas cerca de 3,7m) esta profundidade será, portanto, aproximadamente de até 3 metros.

A condutividade elétrica aparente medida será um valor que representa a integração das condutividades existentes, desde superfície até a uma determinada profundidade de investigação.



dipolos horizontais (H)



bobinas na posição vertical

Figura 2 - Disposição das bobinas e dos respectivos eixos-dipolos em medidas efetuadas com o EM-31 na disposição dipolo horizontal.

Ilustra este fato, a curva de resposta do instrumento de medida em função da profundidade, que será apresentada no item a seguir.

2.2 Resposta instrumental em função da profundidade

As expressões da resposta instrumental (relativa e acumulada) em função da profundidade podem ser obtidas considerando-se um semi-espaço homogêneo abaixo da superfície na qual estão posicionadas as bobinas do sistema EM.

Tomando-se uma camada infinitesimal de espessura dz na profundidade normalizada z (onde z é a profundidade dividida pelo espaçamento entre bobinas), é possível calcular o campo magnético secundário na bobina receptora, originado do fluxo de corrente dentro desta ou de qualquer outra camada horizontal situada neste semi-espaço.

Pode-se construir uma função $\phi(z)$ (Figura 3) que descreve a contribuição relativa ao campo magnético secundário proveniente de uma camada de espessura infinitesimal situada a qualquer profundidade z, com base na expressão dada pela eq.(3), de acordo com McNEILL (1980).

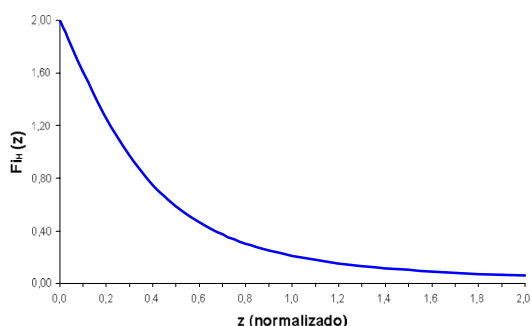


Figura 3 - Resposta relativa versus profundidade para a disposição de dipolo horizontal.

$$\phi_H(z) = 2 - \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{1/2}} \quad (\text{eq.3})$$

Como a condutividade elétrica aparente guarda uma relação com o campo magnético secundário (eq.2), a função representada no gráfico da Figura 3 também fornece a contribuição relativa do material situado a diferentes profundidades ao valor de condutividade aparente medido na superfície, sendo que a integral da função, de zero até infinito, fornece o campo magnético secundário total na bobina receptora.

A partir desta, pode ser definida uma outra função que será utilizada para a quantificação dos dados EM por meio de técnicas de modelamento direto dos mesmos.

2.3 Modelamento direto de dados EM

No modelamento direto de dados EM pode ser definida uma função mais útil para os cálculos, derivada daquela apresentada anteriormente na eq.(3). Ela é definida como a contribuição relativa ao campo magnético secundário (ou a condutividade aparente) proveniente de todo material em subsuperfície abaixo de uma profundidade z , sendo dada por:

$$R_H(z) = \int_z^{\infty} \phi_H(z) dz \quad (\text{eq.4})$$

Esta função (resposta cumulativa) é ilustrada na Figura 4. Da mesma forma que para o caso da resposta relativa (Figura 3), a curva da Figura 4 foi obtida a partir da seguinte expressão matemática (McNEILL, 1980):

$$R_H(z) = (4z^2 + 1)^{1/2} - 2z \quad (\text{eq.5})$$

É possível calcular a leitura que o equipamento fornece em um modelo de terra arbitrariamente estratificada, simplesmente adicionando a contribuição de cada camada de forma independente, ponderadas de acordo com suas condutividades e profundidades, conforme o gráfico da Figura 4.

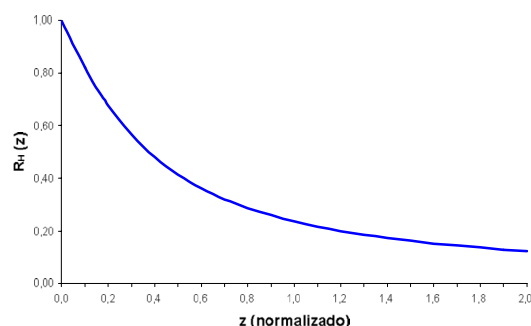


Figura 4 - Resposta cumulativa versus profundidades para a disposição de dipolo horizontal.

Em um modelo de duas camadas, o valor de condutividade aparente medido pelo instrumento será dado pela seguinte expressão (eq.6):

$$\sigma_{ap} = \sigma_1[1 - R_H(z)] + \sigma_2 R_H(z) \quad (\text{eq.6})$$

As parcelas do lado direito da equação representam a contribuição da camada superior (σ_1) e inferior (σ_2) e z é a profundidade do topo da segunda camada (ou a espessura da camada superior).

3. Geologia da área de estudo

A área de estudo está localizada em uma Estação de Tratamento de Esgoto (E.T.E.) situada no distrito de Nossa Senhora dos Remédios, município de Salesópolis-SP, região metropolitana de São Paulo. As coordenadas geográficas do local são $23^{\circ}33'02,5''$ e $45^{\circ}57'55,5''$ onde havia uma contaminação rasa em subsuperfície provocada por esgoto doméstico.

A litologia predominante na área, devido à proximidade de um córrego, é constituída por sedimentos aluviais, compostos essencialmente por areia argilosa e por solo de alteração de granitóides.

Um furo a trado (até a profundidade de 2,7m), realizado nas proximidades do perfil do levantamento, apresentou a seguinte composição granulométrica: 51,04% de areia, 13,50% de silte e 42,65% de argila podendo, portanto, ser classificado como uma areia argilosa. O nível d'água local encontra-se extremamente raso, com profundidades médias variando de 0,3 a 2 metros.

4. Resultados obtidos

Os dados EM, obtidos com medidas efetuadas com disposição horizontal dos dipolos (equivalendo a investigação mais rasa, isto é, até 3m), foram correlacionados com os resultados de um levantamento de eletroresistividade (caminhamento elétrico), realizado no mesmo perfil de aquisição, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre dipolos igual a 1m e 8 níveis de investigação em profundidade ($AB=MN=1m$ e $n=8$).

Para execução do modelamento de dados EM foi considerada uma curva de resposta cumulativa ligeiramente diferente daquela apresentada na Figura 4.

A curva agora apresentada (Figura 5) corresponde a uma situação onde o instrumento de medida está posicionado a um metro acima da superfície do terreno, ou seja, mais próxima da realidade, uma vez que as medidas, em geral, não são obtidas com o equipamento posicionado diretamente sobre o solo, e sim a uma altura que corresponde aproximadamente à cintura do operador de campo, como pode ser verificado na foto da Figura 2.

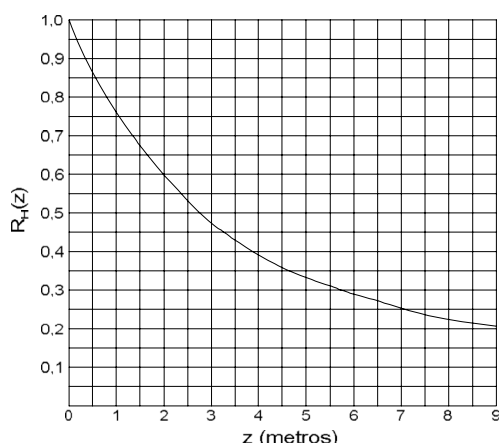


Figura 5 - Resposta cumulativa versus profundidades para o dipolo horizontal e instrumento posicionado a um metro acima da superfície (GEONICS LIMITED, 1992).

Para o ajuste dos dados EM foi proposto um modelo de duas camadas, onde a superior possui uma resistividade igual a 90 ohm.m e a inferior igual a 235 ohm.m.

Estes valores foram estabelecidos após uma cuidadosa análise da seção modelada 2D de resistividade que foi obtida com o programa de inversão de dados RES2DINV (GEOTOMO SOFTWARE, 2004).

Preliminarmente foram determinados os valores das condutividades do modelo da primeira e segunda camada ($\sigma_1=11,1$ mS/m e $\sigma_2=4,3$ mS/m, respectivamente) simplesmente tomando-se o inverso das resistividades definidas anteriormente a partir da seção de resistividade.

Estabelecendo-se valores de z_1 (profundidades do contato entre as duas camadas do modelo), torna-se possível a determinação de $R_H(z_1)$ utilizando o gráfico apresentado na Figura 5.

Com estes parâmetros ($R_H(z_1)$, σ_1 e σ_2) pode ser calculada a resposta do modelo pela eq.(6) expressa pelo parâmetro condutividade elétrica aparente (σ_{ap}).

A concordância numérica entre os valores de σ_{ap} medidos e calculados foi feita com base na tentativa e erro, ajustando-se o parâmetro z_1 em cada ponto de medida EM, que no presente estudo foram tomadas a cada 4m ao longo do perfil de 40m.

A Tabela 1 apresenta os resultados do modelamento, onde a profundidade z_1 foi manualmente ajustada de tal forma que os valores de σ_{ap} calculados estivessem em concordância com σ_{ap} medida (dados de campo) na disposição do dipolo horizontal.

Tabela 1 - Valores de profundidade determinados para um modelo de duas camadas ($\sigma_1=11,1$ mS/m e $\sigma_2=4,3$ mS/m) ajustando-se σ_{ap} medida e σ_{ap} calculada.

X (m)	Z_1 (m)	$R_H(Z_1)$	σ_{ap} medida (mS/m)	σ_{ap} calculada (mS/m)	Δ (%)
0	0,4	0,89	5,0	5,0	0,2
4	0,4	0,89	5,0	5,0	0,2
8	0,0	1,00	4,3	4,0	6,4
12	0,4	0,89	5,0	5,0	0,2
16	1,8	0,63	6,8	7,0	3,0
20	1,2	0,73	6,1	6,0	1,8
24	1,0	0,76	5,9	6,0	1,7
28	1,2	0,73	6,1	6,0	1,8
32	1,8	0,63	6,8	7,0	3,0
36	1,0	0,76	5,9	6,0	1,7
40	1,0	0,76	5,9	6,0	1,7

Na Figura 6 o resultado é apresentado sob a forma de seção, onde constam as duas camadas geoeletricas interpretadas com base no levantamento de dados de EM e a respectiva resposta do modelo.

Para fins comparativos, o modelo EM foi sobreposto à seção modelada de eletrorresistividade 2D (arranjo dipolo-dipolo, $AB=MN=1$ m), podendo ser observada uma excelente correlação dos modelos obtidos através do método elétrico e do método eletromagnético.

5. Conclusões

Através de uma técnica de modelamento direto, utilizando um modelo simples de duas camadas, foi possível estabelecer uma excelente correlação entre dados eletromagnéticos (levantados com o equipamento EM-31, na disposição dipolo horizontal) e uma seção modelada 2D de eletrorresistividade (dados adquiridos com o arranjo dipolo-dipolo e espaçamento entre eletrodos igual a 1m), mostrando a viabilidade de uma direta correlação do parâmetro investigado pelos dois métodos empregados (condutividade ou resistividade elétrica).

6. Agradecimentos

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido na modalidade de Auxílio à Pesquisa (Processo nº 04/01239-8).

7. Referências

GEONICS LIMITED. 1992. EM31 Operating Manual, 56p.

GEOTOMO SOFTWARE. 2004. RES2DINV (v.3.54) and RES3DINV (v.2.14) for Windows 98/ME/2000/NT/XP. Geoelectrical Imaging 2D & 3D, 130p.

McNEILL, J. D. 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction number. Geonics Limited. Technical Note TN-6, Mississagua, Ontario Canadá, 15p. Disponível em <http://www.geonics.com>.

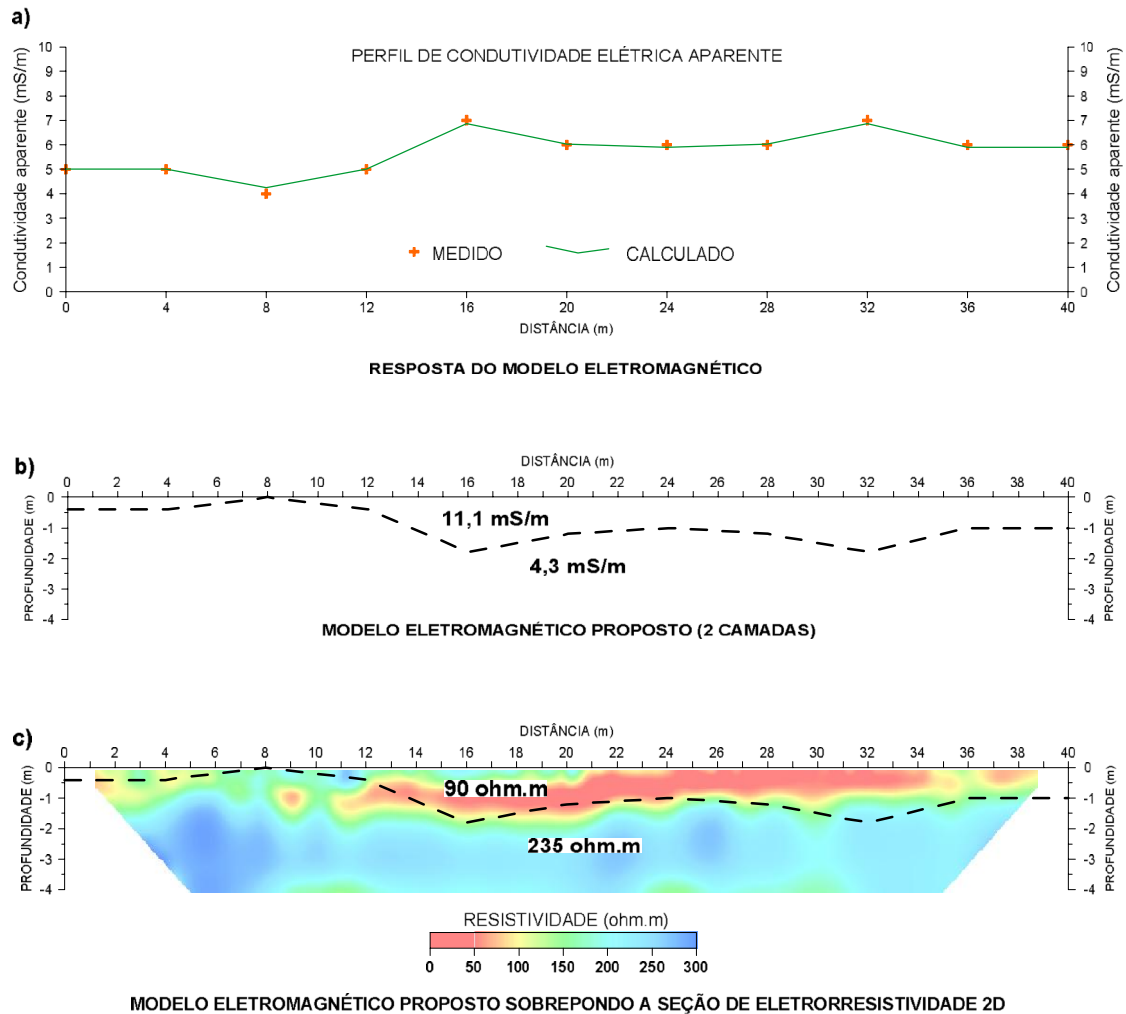


Figura 6 - Correlação dos modelos EM e de eletrorresistividade 2D.

- a) Resposta do modelo (linha contínua em verde) e os dados medidos em campo (pontos em alaranjado).
- b) Modelo proposto com base nos dados EM.
- c) Modelo proposto (os valores do parâmetro das camadas já devidamente convertidos para resistividade) sobrepondo a seção 2D de eletrorresistividade (arranjo dipolo-dipolo, $AB=MN=1m$).