



Análise da Função Objetivo para Inversão de Sondagens Elétricas, Sondagens TDEM e Inversão Conjunta SEV/TDEM: Resultados Preliminares

Cassiano A. Bortolozo (IAG-USP), Oleg Bokhonok (IAG-USP & IPECI/UNISANTOS)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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

In geophysical inversion ambiguities are always present. Inversion processes try to solve the most of the ambiguities, mainly using regularization and constraints. However, how these ambiguities appear is in most cases, only speculated. For this type of problem, it is interesting to investigate the ambiguities concerning the parameters of the studied models. Then the topography of the objective function problem's is needed. We used the method called Residual Dispersion Maps Function (RFDM) which enables a more elaborate way to differentiate the overall ambiguity of local minima. With the objective function's topographical analysis it is possible to evaluate the advantages and limitations of electrical sounding compared to the method of TDEM survey. And the benefits of joint inversion compared to individual methods. The RFDM analysis proved to be a very interesting tool for understanding the joint inversion method DC/TDEM. With the preliminary analysis of the results, we can start to understand how the joint inversion can reduce the ambiguities of the methods.

Keywords: Electrical sounding, TDEM sounding, Joint inversion, dispersion maps.

Introdução

Na inversão de dados geofísicos as ambiguidades estão sempre presentes. Ainda mais quando se tem casos não lineares, que representam a maioria dos problemas geofísicos. Os processos de inversão tentam resolver ao máximo as ambiguidades, usando principalmente regularizações e constrangimentos. Porém a forma como essas ambiguidades de fato se apresentam é na maioria dos casos, apenas especulada. Para este tipo de problema, é interessante investigar as ambiguidades relativas dos parâmetros dos modelos estudados. Pois entendendo como essas ambiguidades se apresentam é possível escolher um algoritmo de inversão mais eficiente e as regularizações mais adequadas. Uma forma de estudar as ambiguidades é pelo estudo da função objetivo do problema. Dessa forma são necessárias informações sobre a localização e tamanho dos máximos e mínimos locais. Sendo assim precisamos saber a topografia da função objetivo.

A forma convencional para obter a topografia da função objetivo é através Residual Map Function (RFM). Para construir este mapa, dois parâmetros são feitas variável e os outros são mantidos fixos em seus valores corretos. O método convencional de obter a topografia da função objetivo é através da Residual Map Function (RFM). Esses mapas são elaborados mantendo todos os parâmetros do modelo fixados com exceção dos dois parâmetros a serem analisados. Dessa forma são analisados os parâmetros aos pares, um em relação ao outro. No entanto, o mapeamento RFM enfrenta sérias limitações para os modelos com mais de dois parâmetros. Já que o conhecimento dos valores exatos dos parâmetros a serem fixos é necessário, o RFM só é possível ser feito com modelos sintéticos. A discretização dos parâmetros também pode mascarar os máximos e mínimos da função objetivo.

Porém nos trabalhos de Bokhonok (2010), Bokhonok et al. (2013) os autores propõe uma forma alternativa e mais elaborada de estudar a topografia da função objetivo de um problema. Usando o método chamado de Residual Function Dispersion Maps (RFDM). Esse método baseia-se na análise da dispersão dos resultados de milhares de inversões estocásticas. Os parâmetros invertidos são representados em mapas bidimensionais, parâmetro contra parâmetro. Porém os pontos refletem modelos que não possuem os demais parâmetros fixados. Pontos próximos no gráfico de parâmetro versus parâmetro não necessariamente possuem os demais parâmetros semelhantes. O método (RFDM) dessa forma possibilita de uma maneira mais elaborada diferenciar a ambiguidade global de mínimos locais.

Nos trabalhos de Bortolozo (2011) e Bortolozo et al. (2015) as vantagens do uso da inversão conjunta SEV/TDEM são apresentadas para casos reais e sintéticos. No trabalho de Bortolozo et al. (2014) essa metodologia é empregada em grande escala e seus resultados comparados com as inversões individuais. Nesses trabalhos é discutida como a inversão conjunta pode reduzir as ambiguidades presentes nos dois métodos. Porém o que propomos no presente trabalho é mostrar através da análise da função objetivo como de fato a inversão conjunta pode reduzir as ambiguidades presentes nos dois métodos separadamente. Com a análise da topografia da função objetivo vamos estudar as vantagens e limitações da sondagem elétrica comparada ao método da sondagem TDEM. E as vantagens da inversão conjunta em relação às metodologias individuais.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido inicialmente elaborando um modelo sintético que represente uma situação geológica encontrada no estado de São Paulo como a Bacia do Paraná. Esse modelo é uma simplificação da geologia encontrada e isso é mostrado em Bortolozzo (2014) e Bortolozzo (2015). A seguir é necessário definir o problema direto a ser usado, no caso usamos formulações comumente utilizadas para a sondagem elétrica e sondagem TDEM. A definição da função objetivo para cada caso é um passo importante para o estudo. Usamos nesse caso uma função R2 tanto para as inversões individuais quanto para a conjunta. Para a inversão usamos o algoritmo Nelder-Mead simplex, que é um algoritmo rápido e usado em muitas situações. Na sequência são descritos em detalhes as diversas etapas.

Problema Direto SEV

A primeira formulação a usar filtros lineares para resolver o problema direto de eletrorresistividade é creditada a Ghosh (1971a, 1971b). Esse método consiste em resolver a integral da função de resistividade aparente por um convolução de um função transformada da resistividade com uma função filtro. A função transformada da resistividade é calculada para cada modelo e então é convolvida com um conjunto de valores de filtro previamente calculados. No trabalho de Johansen (1975) o autor aprimora a técnica usando um conjunto de filtro maior, dessa forma aumentando significativamente a precisão do cálculo. Nesse trabalho usaremos a formulação e os filtros desenvolvidos por Johansen (1975).

Problema Direto TDEM

De forma análoga a sondagem elétrica vertical a solução para o problema direto da sondagem TDEM vai ser obtida pela filtragem linear. Nesse trabalho usamos a aproximação de um loop circular sobre um meio estratificado. Para o cálculo do campo H_z no centro do loop usamos a formulação apresentada por Nielsen and Baumgartner (2006). Nesse trabalho, o cálculo das integrais para a solução final para o campo H_z no domínio do tempo é feita usando os filtros lineares apresentados por Christensen (1990).

Modelo Sintético

O modelo sintético usado nessa trabalho é baseado no modelo geoeletrico encontrado na bacia sedimentar do Paraná. O vetor de parâmetros utilizados para o problema é $m = \{\rho_1 = 30, \rho_2 = 200, \rho_3 = 50, \rho_4 = 600, h_1 = 2, h_2 = 40, h_3 = 60\}$, onde ρ é a resistividade (ohm.m) e h é a espessura (m). Os parâmetros de aquisição usados para a SEV foi um levantamento com AB/2 máximo de 200m. Para a sondagem TDEM um loop quadrado de 100mx100m, com uma bobina receptora de 100m² de área efetiva.

Número de Camadas	Resistividade (Ohm.m)	Espessura (m)
1	30	2
2	200	40
3	50	60
semi-espaco	600	-

Tabela 1. Modelo geoeletrico utilizado no trabalho

Função Objetivo

As funções objetivo utilizadas nesse trabalho são de norma quadrática sem regularizações, elas são apenas normalizadas pelo número de dados. Dessa forma \vec{d} são os dados sintéticos do modelo descrito acima e $h(\mathbf{p})$ os valores obtidos com a modelagem de cada modelo obtido no processo de inversão. No caso das inversões individuais a função objetivo é dada da seguinte forma:

$$\phi(\vec{d}, \mathbf{p}) = \|\vec{d} - h(\mathbf{p})\| / N_p \quad (1)$$

enquanto que para a inversão conjunta a função objetivo é dada da seguinte maneira:

$$\phi_{Conjunta}(\vec{d}, \mathbf{p}) = \frac{\|\vec{d}_{SEV} - h_{SEV}(\mathbf{p})\| + \|\vec{d}_{TDEM} - h_{TDEM}(\mathbf{p})\|}{(N_{pSEV} + N_{pTDEM})} \quad (2)$$

os subscritos SEV e TDEM definem especificamente o \vec{d} e o $h(\mathbf{p})$ de cada metodologia.

Otimização

A otimização foi feita utilizando o algoritmo Nelder-Mead simplex de um modo multi-start, ou seja, o algoritmo foi aplicado milhares de vezes com valores diferentes de entrada. Apesar de ser um algoritmo estocástico o Nelder-Mead não possui grande capacidade de busca global, porém é muito rápido e os milhares de inicializações podem ser realizados em tempo hábil. Dessa forma é ideal para nosso problema, possui rapidez e alguma convergência para mínimos globais/locais.

Resultados Preliminares e Discussão

A seguir serão mostrados os resultados preliminares obtidos na pesquisa em andamento. Nas Figuras 1, 2 e 3 estão os resultados para a primeira camada do modelo sintético para a sondagem elétrica, sondagem TDEM e conjunta respectivamente. Para todos os casos o número de otimizações é o mesmo: 8000. Com relação às cores dos pontos apresentada nos gráficos ela mostra o RMS obtido com o modelo em questão, sendo os pontos pretos os menores valores de RMS, inferior a 0,25%. Os resultados mostram que para a primeira camada a SEV

possui uma dependência linear muito forte entre a resistividade e espessura da camada. Outra constatação é que os resultados mostram que a função objetivo nesse caso é muito rugosa. Como o algoritmo usado tende a cair em mínimos (locais ou global) e os pontos estão dispersos ao longo da diagonal, concluímos que ao longo da diagonal existem muito pequenos mínimos locais nos quais esses pontos estão localizados. Para o caso da primeira camada com o TDEM (Figura 2) os resultados mostram o esperado, a falta de definição dessa camada. Isso era esperado uma vez que para o arranjo loop central a sondagem não possui precisão até cerca de 10% do lado do loop (cerca de 10m de profundidade). Já no caso da inversão conjunta os resultados mostram uma situação muito interessante. Apesar de aparentar ter menos pontos que o gráfico da SEV o número de pontos é o mesmo. O que acontece nesse caso é que muitos dos pontos acabaram sobrepostos. O fato de não possuir uma diagonal muito bem marcada como no caso da sondagem vertical indica que o algoritmo conseguiu chegar com mais frequência aos mesmos mínimos. Isso aliado ao fato de a dispersão dos pontos pretos (menores RMS) é menor nos dois eixos no caso da inversão conjunta mostra que de fato a inversão conjunta reduz as ambiguidades e os mínimos locais. A dependência linear aparentemente foi reduzida, mas ainda serão necessários mais testes para essa certificação.

Para a segunda camada isso fica ainda mais evidente. Quando comparamos os resultados da sondagem elétrica (Figura 4), da sondagem TDEM (Figura 5) e da inversão conjunta (Figura 6) a mesma situação aparece. Os pontos ficam mais concentrados próximos ao mínimo global e existe uma menor dispersão. Em relação à diminuição da ambiguidade a segunda camada se mostra um exemplo ainda melhor que a primeira. Os resultados da terceira camada corroboram os resultados já apresentados e serão mostrados em detalhe no evento. Os resultados da resistividade do embasamento geoeletrico são mostrados nas Figuras 7, 8 e 9. Nesse gráfico o eixo x é a resistividade elétrica obtida para última camada e o eixo y a espessura total até o embasamento. A profundidade real do embasamento ultrapassa o limite teórico de investigação de uma SEV com abertura máxima de $AB/2=200m$. Então assim como o TDEM para a primeira camada, nesse caso a SEV não possui boa resolução para determinar essa resistividade. Os resultados obtidos, porém mostram que assim como nos outros casos a inversão conjunta conseguiu reduzir as ambiguidades presentes nos casos individuais. Fazendo com que os resultados se concentrem mais próximos ao mínimo global.

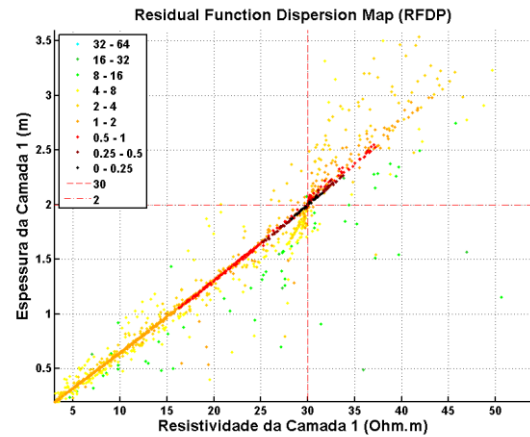


Figura 1. Resultados obtidos pelo método RFDP para a Sondagem Elétrica Vertical para a primeira camada do modelo sintético. As linhas vermelhas tracejadas indicam os valores verdadeiros do modelo.

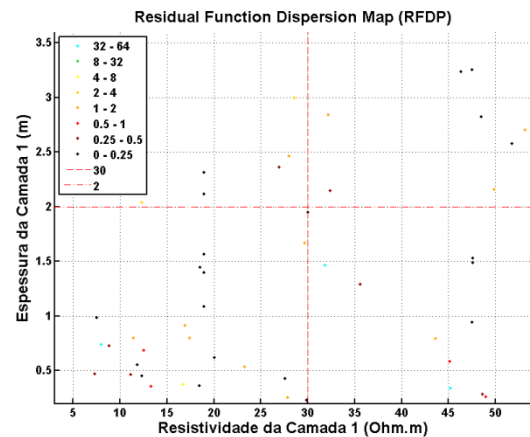


Figura 2. Resultados obtidos pelo método RFDP para a Sondagem TDEM para a primeira camada do modelo sintético. As linhas vermelhas tracejadas indicam os valores verdadeiros do modelo.

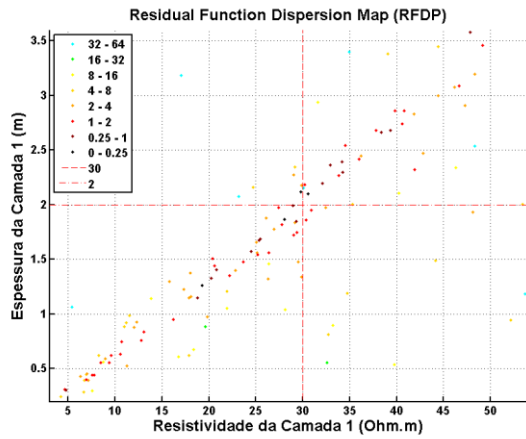


Figura 3. Resultados obtidos pelo método RFDP para a Inversão Conjunta para a primeira camada do modelo sintético. As linhas vermelhas tracejadas indicam os valores verdadeiros do modelo.

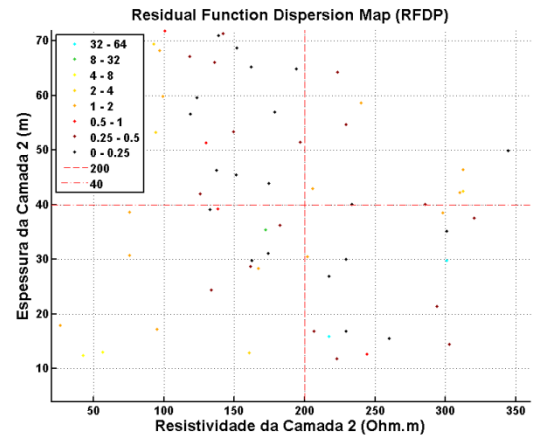


Figura 5. Resultados obtidos pelo método RFDP para a Sondagem TDEM para a segunda camada do modelo sintético. As linhas vermelhas tracejadas indicam os valores verdadeiros do modelo.

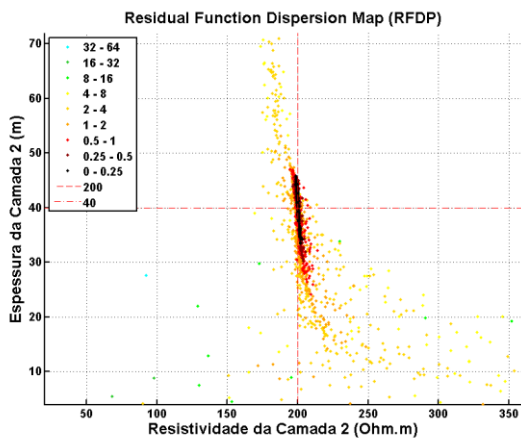


Figura 4. Resultados obtidos pelo método RFDP para a Sondagem Elétrica Vertical para a segunda camada do modelo sintético. As linhas vermelhas tracejadas indicam os valores verdadeiros do modelo.

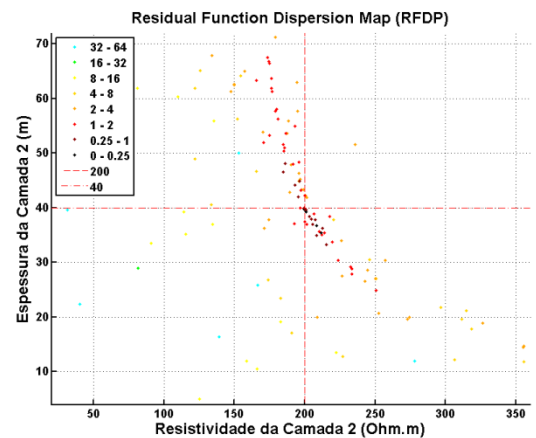


Figura 6. Resultados obtidos pelo método RFDP para a Inversão Conjunta para a segunda camada do modelo sintético. As linhas vermelhas tracejadas indicam os valores verdadeiros do modelo.

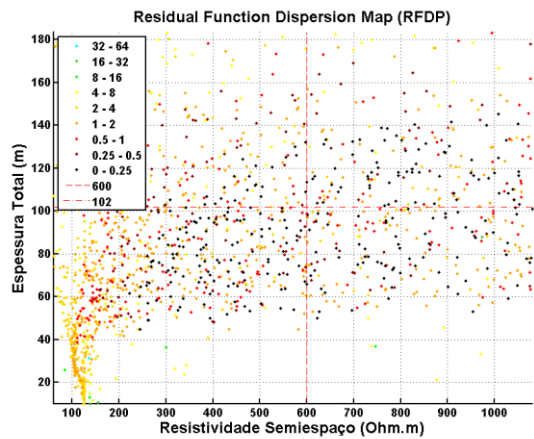


Figura 7. Resultados obtidos pelo método RFDP para a Sondagem Elétrica Vertical para o embasamento geolétrico do modelo sintético. As linhas vermelhas tracejadas indicam os valores verdadeiros do modelo.

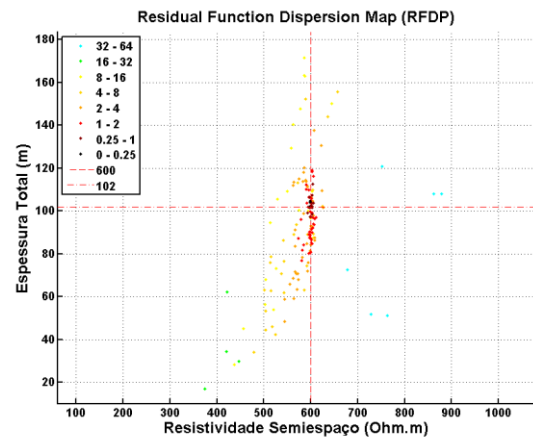


Figura 9. Resultados obtidos pelo método RFDP para a Inversão Conjunta para o embasamento geolétrico do modelo sintético. As linhas vermelhas tracejadas indicam os valores verdadeiros do modelo.

Conclusões

A análise RFDM se mostrou muito útil para o entendimento do método de inversão conjunta SEV/TDEM. Pela análise preliminar dos resultados podemos entender como a inversão conjunta pode reduzir as ambiguidades dos métodos usando análise da topografia da função objetivo. Os próximos passos no trabalho são aumentar o número de inversões a serem analisadas e fazer uma análise estatística dos resultados obtidos para podermos termos condições de fazer uma análise quantitativa.

Agradecimentos

OB agradece pelo suporte à Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). CAB agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de estudos (Número 2011/06404-0).

Referencias

- Bokhonok, O., 2010. Sísmica de reflexão rasa multicomponente: Aquisição e inversão de tempos de trânsito e amplitudes, IAG, Universidade de São Paulo.
- Bokhonok, O., Diogo, L. A., Prado, R. L., 2013. Velocity and density estimation from nonlinear amplitude inversion of prestack multicomponent shallow seismic data: A numerical model study. Thirteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Bokhonok, O., et. al., 2015. Residual function dispersion maps to evaluate multidimensional objective function topography: Near-surface geophysical inverse problems. Fourteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Bortolozzo, C.A., 2011. Inversão conjunta 1d de dados de SEV e TDEM: Aplicações em hidrogeologia, IAG, Universidade de São Paulo.

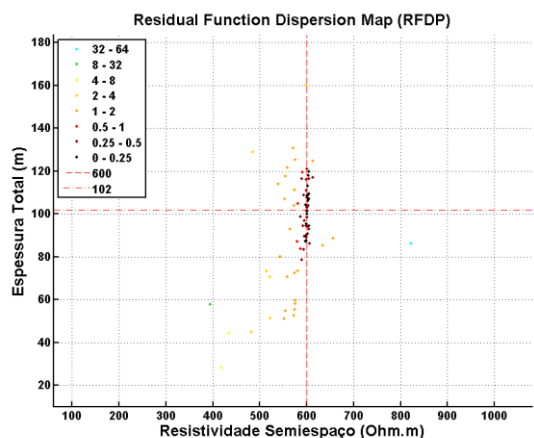


Figura 8. Resultados obtidos pelo método RFDP para a Sondagem TDEM para o embasamento geolétrico do modelo sintético. As linhas vermelhas tracejadas indicam os valores verdadeiros do modelo.

Bortolozo, C.A., 2014. Geoelectrical characterization using joint inversion of VES/TEM data: A case study in Paraná

Sedimentary Basin, São Paulo State, Brazil. *Journal of Applied Geophysics* 111, 33–46.

Bortolozo, C.A., Porsani, J. L., Monteiro dos Santos, F. A., Almeida, E. R., 2015. VES/TEM 1D joint inversion by using Controlled Random Search (CRS) algorithm. *Journal of Applied Geophysics* 112, 157–174.