



Utilização de uma metodologia inovadora para interpretação de dados de sondagem elétrica vertical (SEV) visando investigação profunda na Bacia do Paraná, porção oeste do Estado de São Paulo

Oleg Bokhonok (IAG-USP & IPECI/UNISANTOS), Otávio Coaracy Brasil Gandolfo (IPT & IPECI/UNISANTOS), Antonio Celso de Oliveira Braga (IGCE/UNESP), Jorge Luís Porsani (IAG-USP), Cassiano Antonio Bortolozo (IAG-USP), Liliana Alcazar Diogo (IAG/USP)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th 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

A new methodology for processing vertical electrical sounding (VES) is presented. The field data, acquired in eighties, consists of VES with a long AB length, acquired at the Paraná Sedimentary Basin, in the western portion of the State of São Paulo, for oil and gas prospecting purposes. The Residual Function Dispersion Maps (RFDM) was obtained. Analysis of these maps allowed the construction of the geoelectric model in subsurface and the understanding about the relative ambiguity of the parameters. Further improvements for data analysis and interpretation can be achieved at the time when seismic data acquired in Paraná Basin will be available.

Keywords: VES, Residual Function Dispersion Map, Inversion, Barcia do Paraná

Introdução

A inversão dos dados geofísicos para caracterização geoeétrica do meio geológico é um grande desafio, pois lida com problemas de otimização não lineares, multidimensionais e multimodais. Sendo assim, esse tipo de problema exige uma análise de ambiguidade relativa dos parâmetros do modelo, entendimento se todos os parâmetros podem ser determinados e só na base dessas informações já fazer a escolha de um algoritmo ou então a estratégia de otimização apropriada. Por tanto, é necessário obter a informação sobre o número, posição, distribuição e tamanho de mínimo e/ou máximo de função, ou seja, obter o conhecimento sobre a topografia da função objetivo. A forma convencional para obter a topografia da função objetivo é através dos mapas de função residual (*Residual Function Maps - RFM*) (Menke, 1989).

Apesar de amplo uso dessa metodologia para investigar problemas de inversão multidimensionais, este tipo de procedimento funciona bem apenas nos casos quando o problema inverso possui duas incógnitas. Para problemas multidimensionais, muito frequentes em geofísica aplicada, essa análise fornece informações errôneas sobre a topografia da função, por não permitir observar seu comportamento global, uma vez que são observadas

fatias (seções transversais) da função. Ou seja, observa-se apenas a variação de dois parâmetros enquanto os outros parâmetros são fixados em seus valores corretos. Além disso, a geração destes mapas para modelos com mais de dois parâmetros não é possível para os dados reais, pois requer conhecimento obrigatório de valores exatos dos parâmetros a serem fixados. Para superar as limitações da metodologia convencional usada para construir os mapas de função residual, foi usada uma estratégia alternativa idealizada por Bokhonok et al. (2015). Esse método baseia-se na análise da dispersão dos resultados de milhares de inversões individuais. Os parâmetros invertidos são representados em mapas bidimensionais, parâmetro versus 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 (Residual Function Dispersion Maps)* dessa forma possibilita de uma maneira mais elaborada diferenciar a ambiguidade global de mínimos locais. Neste trabalho foram obtidos os mapas residuais de função objetivo de dados reais usando como exemplo uma sondagem elétrica vertical (SEV) adquirida na Bacia Sedimentar do Paraná na porção oeste de Estado de São Paulo. Análise destes mapas permitiu além de construção do modelo geoeétrico em subsuperfície, obter o entendimento sobre a ambiguidade relativa dos parâmetros.

Geologia

O local onde foi realizada a SEV apresentada neste trabalho encontra-se sobre sedimentos do Grupo Bauru, que ocorre em grande parte do Estado de São Paulo, sendo formado pelas Formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília. Assenta-se diretamente sobre basaltos da Formação Serra Geral podendo, localmente repousar sobre sedimentos das Formações Botucatu e Pirambóia. Nas diversas formações do Grupo Bauru predominantemente ocorre arenitos finos a muito finos, normalmente maciços, estratos de lamitos siltsos e intercalações de argilitos.

Materiais e métodos

Esse trabalho foi desenvolvido utilizando uma sondagem elétrica vertical profunda que foi realizada na década de 80, nas proximidades da cidade de Bauru, região oeste da cidade de São Paulo, dentro de um programa de exploração do consórcio IPT/CESP (Paulipetro). A campanha tinha por objetivo a caracterização da estratigrafia da Bacia Sedimentar do Paraná, no Estado

de São Paulo, para fins de prospecção de estrutura favoráveis à ocorrência de petróleo e gás natural. Resultados da interpretação de diversas SEVs realizadas nesta ocasião, gerando mapas temáticos com modelos de isópacas e contornos estruturais das formações Serra Geral e Botucatu, inclusive do embasamento cristalino, podem ser encontrados em Braga et al. (2016a).

Técnica da sondagem elétrica vertical

O propósito de uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV), método da eletrorresistividade, é determinar com a base na curva de resistividade aparente adquirida no campo, a distribuição vertical da resistividade sob o ponto sondagem.

Na maioria dos casos, trata-se encontrar um modelo de camadas horizontais e paralelas com os respectivos valores de resistividade que explica a curva obtida no campo usando a informação a priori sobre a geologia local. Ou seja, resolver o problema inverso.

A SEV foi adquirida utilizando o arranjo Schlumberger que consiste na obtenção de diversas medidas de resistividade, mantendo uma separação crescente entre eletrodos de emissão de corrente (AB), permanecendo fixo o dipolo de leitura do potencial elétrico (MN), posicionados simetricamente em relação a um ponto central do arranjo (Figura 1).

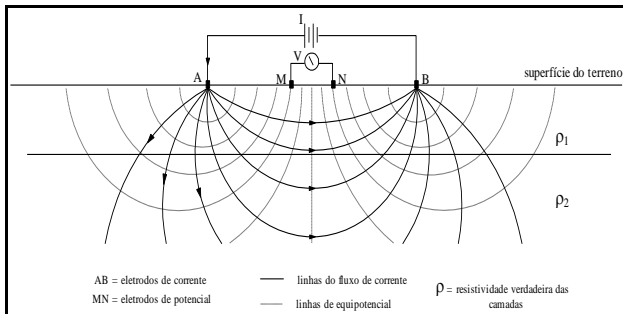


Figura 1 - Técnica da técnica sondagem elétrica vertical, arranjo Schlumberger.

Este tipo de ensaio é muito utilizado em estudos rasos aplicados à Geologia de Engenharia, Ambiental, Hidrogeologia, assim como para estudos profundos de cunho acadêmico ou aplicados à Geologia de Petróleo (Braga, 2016b).

Problema Direto

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 uma convolução de uma 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 este autor.

Função Objetivo

As funções objetivo utilizadas nesse trabalho também são de norma quadrática sem regularizações, normalizada pelo número de dados (Equação 1). Dessa forma, são os dados sintéticos do modelo descrito acima e $h(\mathbf{p})$ os valores calculados usando os parâmetros obtidos no processo de inversão.

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

Residual Function Dispersion Map (RFDM)

A metodologia baseia-se na análise da dispersão resultados obtidos a partir de várias execuções (*multi-start*), de um algoritmo de otimização heurístico baseado em simplex sem limitação de espaço de busca. Os parâmetros invertidos são representados em mapas bidimensionais, sem fixar outros parâmetros do modelo. A análise da dispersão das soluções é feita no formato de mapa, onde a terceira dimensão é representada pelo valor de erro em escala de cores.

Resultados e Discussão

Análise de *Residual Function Dispersion Maps* permitiu revelar a complexidade da topografia de funções objetivos resultantes de dados reais de SEV interpretada. A seguir serão apresentados os resultados obtidos na pesquisa em andamento. Nas Figuras de 2 a 6 estão os resultados de primeira à quinta camada de modelo obtido. As cores dos pontos apresentados em forma de dispersão nos gráficos mostram o *RMS* obtido com SEV em questão, sendo que os pontos pretos são os menores valores de *RMS*, inferior a 0,52%. Na Figura 7 está apresentada a comparação de curva de SEV medida versus calculada usando os parâmetros de modelo geológico estimado.

Análise de *RFDMs* mostrou que os parâmetros de primeira, segunda e terceira camada podem ser determinados, entretanto não igualmente bem. Diferentemente de primeira camada, onde a ambiguidade relativa dos parâmetros é insignificante (Figura 2), os parâmetros de segunda e terceira camada possuem ambiguidade relativa que deve ser considerada (Figura 3 e 4). A resistividade e espessura determinados para primeira camada são de 3688 ohm.m e 8,098 m respectivamente. No caso de segunda camada pode ser observada uma dependência linear entre a resistividade e espessura, além de ambiguidade relativa ligeiramente maior para a determinação de resistividade. A resistividade e espessura determinados para segunda camada são de 139,15 ohm.m e 14,46 m, respectivamente. Já para a terceira camada percebe-se que a ambiguidade na determinação de resistividade é significativamente menor comparando com a espessura da mesma camada. A resistividade e espessura determinados para terceira camada são de 13,72 ohm.m e 282,83 m, respectivamente.

Quadro completamente diferente observa-se para as camadas mais profundas (abaixo de 305 metros), quando os parâmetros são extremamente ambíguos e não podem ser determinados com precisão. Para caso de quarta camada (Figura 5) é observada a dependência não linear entre a resistividade e a espessura, e pode ser observado que a resistividade é superior a 25 ohm.m e a espessura provavelmente é inferior à 250 m. Na Figura 6 aparece uma forte dependência linear entre a resistividade e espessura de quinta camada e pode ser observado que a resistividade provavelmente é inferior à 5 ohm.m e a espessura inferior à 600 m. O parâmetro de resistividade de sexta camada (semi-espaço) é altamente ambíguo e provavelmente possui valor acima de 2000 ohm.m. A Tabela 1 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 1 - Modelo geoeétrico estimado.

Número de Camadas	Resistividade (Ohm.m)	Espessura (m)
1	3688	8,098
2	139,15	14,46
3	13,72	282,83
4	>25	<250
5	<5	<600
semi-espaço	>2000	

Conclusões

Os resultados obtidos sugerem que *RFDM* é uma excelente ferramenta para análise de problemas de inversão não lineares, quando se trata de funções objetivo multidimensionais e multimodais.

No exemplo apresentado neste trabalho foi demonstrada a utilidade desta metodologia para interpretação de dados de sondagem elétrica vertical. Os parâmetros de primeiras três camadas superiores foram determinados com alta precisão. Os parâmetros de três camadas mais profundas e semi-espaço se mostraram ambíguos, mas o conhecimento de dependências entre resistividade e profundidade de cada camada permite estimativa de limites superior ou inferior de valor dos parâmetros. Outra utilidade de conhecimento das dependências entre os parâmetros pode surgir acessando, por exemplo, informação de espessura de camada a partir de dados sísmicos, pois com o valor de espessura e usando informação de dependência entre os parâmetros é possível determinar a resistividade.

A companhia Global Geophysical a serviço de Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pretende finalizar aquisição de dados sísmicos nesta porção de Estado de São Paulo durante o ano 2017. Neste contexto, os dados de sondagens elétricas verticais disponíveis nesta região ganham uma importância ainda maior. Portanto, é desejável um melhor entendimento destas sondagens, possivelmente correlacionadas com os dados sísmicos, a fim de se evitar interpretações errôneas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT e ao Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP pela disponibilização do dado utilizado neste trabalho.

Bokhonok O. agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Pós-doutorado (Processo: 152366/2016-4).

Bokhonok O., Porsani J.L., Diogo L.A. e Bortolozzo C.A. agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte por meio de projeto PVE (Projeto 406653/2013-5).

Referências

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.

Braga, A. C. O.; Dourado, J. C.; Birelli, C. A.; Blanco, R. G.; Francisco, R. F. 2016a. Geofísica aplicada no controle estrutural na área do Domo de Piratininga (SP). Revista Geociências (UNESP), São Paulo, v.35, n.4, p. 598-608.

Braga, A. C. O. 2016b. Geofísica Aplicada: Métodos Geoeétricos em Hidrogeologia. Editora Oficina de Textos. 159p.

Gosh, D. P. 1971a. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity soundings measurements. Geophysical Prospecting, v.19, n.2, p.192-217.

Gosh, D. P. 1971b. Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. Geophysical Prospecting, v.19, n.4, p.769-775.

Johansen H.K. 1975. An interactive computer1 graphic-display-terminal system for interpretation of resistivity soundings. Geophysical Prospecting. v.23, n.3, p.449-458.

Menke, W. 1989. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. 1st Edition, Academic Press, San Diego, 289.

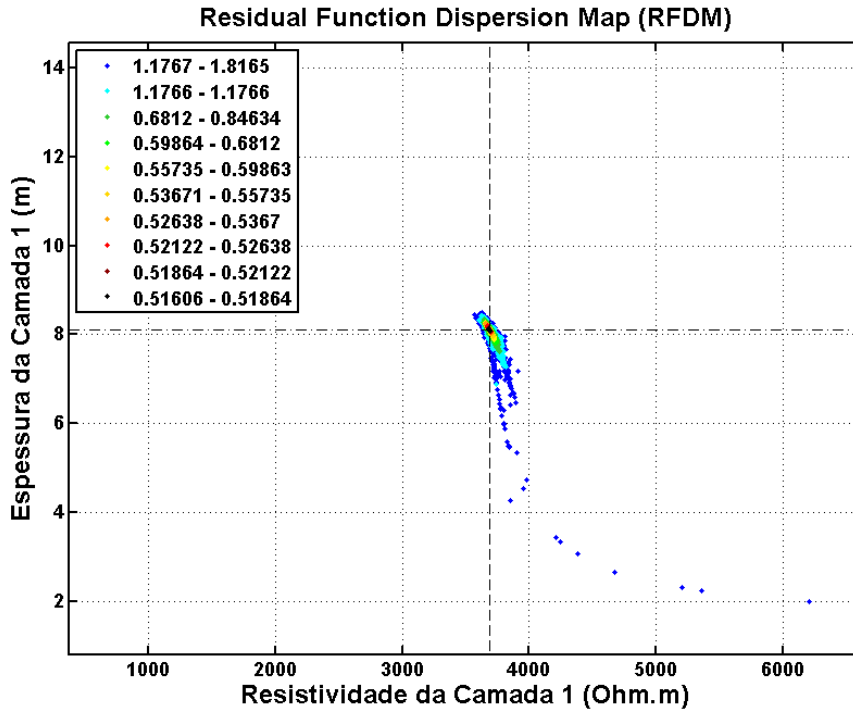


Figura 2 - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de primeira camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.

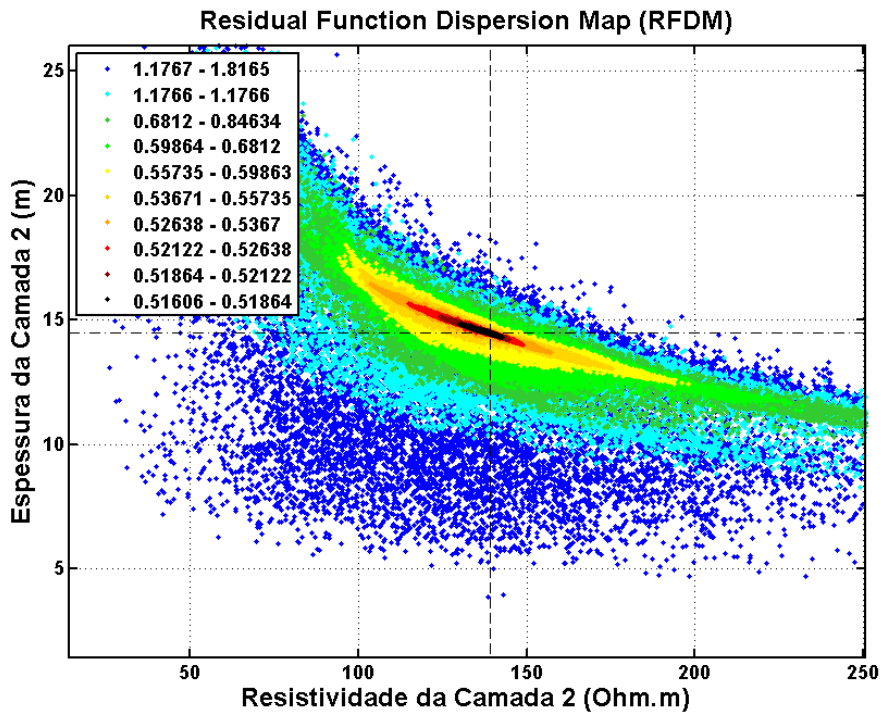


Figura 3 - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de segunda camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.

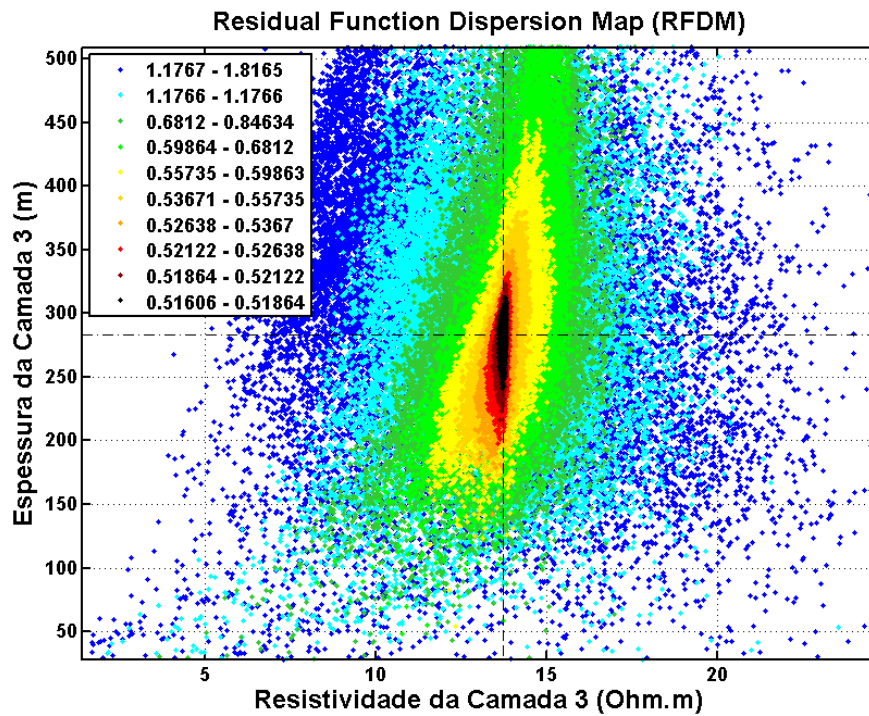


Figura 4 - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de terceira camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.

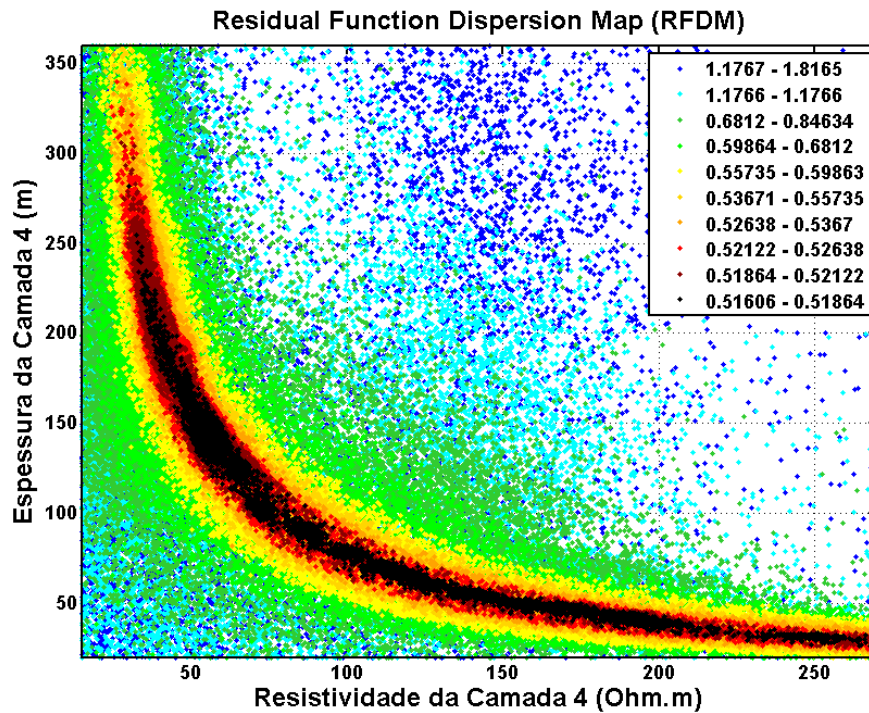


Figura 5 - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de quarta camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.

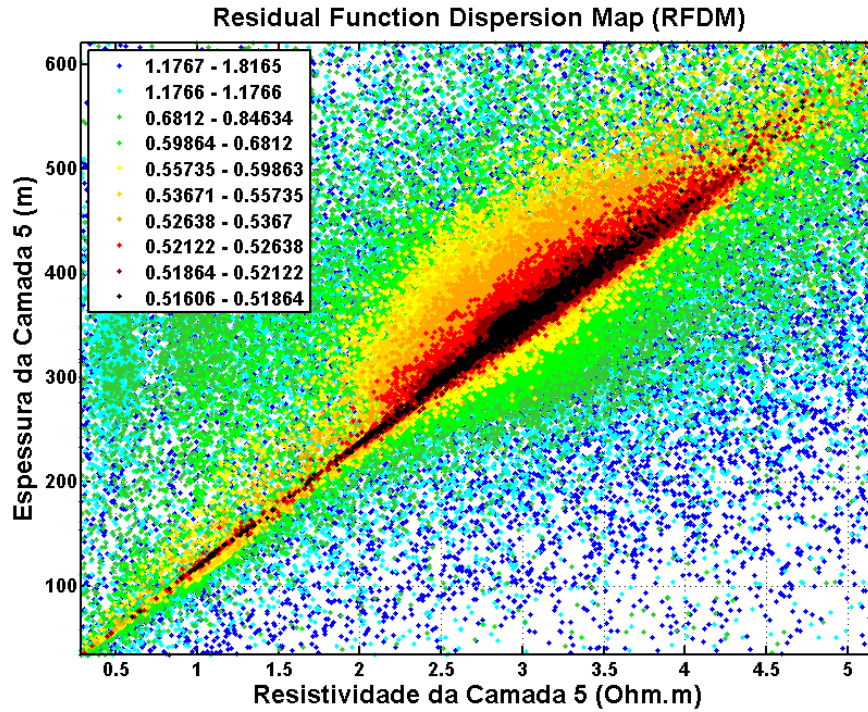


Figura 6 - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de quinta camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.

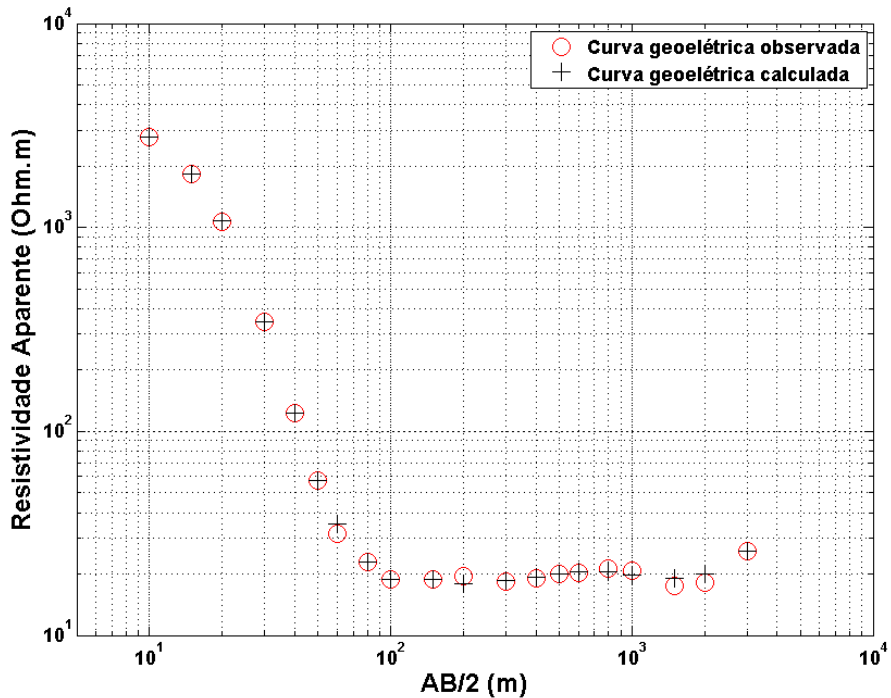


Figura 7 – Comparação da curva observada (cruz de cor preta) e curva calculada (círculo de cor vermelho). Grau de ajuste apresentou erro RMS de 0,52%.