



Utilização do Método Resistivo Capacitivo em ambiente de praia

Elis, V.R.¹, Ustra, A.T.¹, Barbosa, A. M.², Santos, P.J.P.³, Bezerra, B.M.³, Stangari, M.C.¹, Mendonça, C.A.¹

¹ Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP.

² Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

³ Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX 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

A evolução dos estudos ambientais têm requerido novas tecnologias de investigação. Muitas vezes é imprescindível uma cobertura contínua do sítio para localizar as fontes de contaminação, o que não é possível com o uso de métodos diretos que fornecem informações pontuais. Nesse aspecto, a Geofísica Aplicada têm se mostrado eficiente, com a utilização de novos métodos que fornecem resultados com excelente cobertura em área e de forma rápida. Dentre esses métodos se destaca o Método Resistivo Capacitivo. Trabalhos de investigação ambiental com esse método têm sido relatados com bons resultados, mas é necessário que se respeitem as bases físicas operacionais do método para que os dados sejam confiáveis. Esse trabalho apresenta os resultados de testes realizados em ambiente de praia, caracterizado por um meio de alta condutividade, onde a aquisição de dados com o equipamento configurado com cabos dipolares menores resulta em dados extremamente ruidosos. Por outro lado, a configuração com cabos dipolares maiores permite a transmissão de corrente elétrica mais alta ao terreno resultando na aquisição de dados de boa qualidade.

Introdução

Os estudos de diagnóstico ambiental têm requerido cada vez mais a utilização de métodos de investigação que forneçam uma grande quantidade de dados a baixos custos e de forma rápida, de forma que áreas relativamente extensas possam ser cobertas. Métodos geofísicos desenvolvidos recentemente têm mostrado essa característica, de fazer uma varredura do sítio contaminado com alta densidade de dados. Um método que se enquadra nessa descrição é o Método Resistivo Capacitivo, que por sua característica de não precisar de contato galvânico e portabilidade do sistema vem sendo aplicado em diversos casos de contaminação ambiental.

Por se tratar de um método relativamente novo, em algumas situações de campo os parâmetros de aquisição precisam ser avaliados e adaptados para obter as respostas desejadas. Uma situação que requer atenção é na investigação em ambientes com altas condutividades, onde as relações entre tamanho dos cabos condutores e

corda não condutora irão definir as possibilidades de utilização bem como a qualidade dos dados. Esse tipo de situação é encontrado em ambiente litorâneo, sendo que nesse trabalho são apresentados e analisados os resultados obtidos em levantamento em praia para diferentes configurações do sistema.

Área de estudo

Nesse trabalho são apresentados os resultados de ensaios de Resistividade Capacitiva com o equipamento OhmMapper para avaliar a presença de material remanescente do derramamento de óleo que ocorreu no litoral do nordeste brasileiro no segundo semestre de 2019. Esse desastre atingiu 2.880 km de extensão em área, sendo que mais de 200 toneladas de material oleoso foi removido de ambientes costeiros em cerca de cinco meses. De acordo com IBAMA (2019), devido aos impactos do acidente nas praias, técnicos do IBAMA juntamente com as comunidades locais trabalharam na remoção da camada sobrenadante de óleo denso da água, areia e rochas, além de atender prontamente a fauna afetada. Pode-se considerar que foram especialmente eficientes na remoção dos resíduos das praias, sendo que atualmente os resíduos não são visíveis.

As áreas estudadas no projeto estão localizadas no litoral sul de Pernambuco. Bomtempo Filho et al. (2021) realizaram por meio de métodos diretos uma avaliação temporal da ocorrência de contaminantes remanescentes em algumas praias de Pernambuco, e os resultados mostraram intenso intemperismo dos resíduos remanescentes devido ao ambiente de alta energia. Encontraram somente bolas de óleo retrabalhadas pela erosão sazonal. Não foram encontrados resíduos de óleo em sedimentos subsuperficiais rasos. Esses ensaios diretos são pontuais, realizados com a retirada de amostras de sedimentos de locais onde se tem notícia da chegada do óleo. Pelo fato de não encontrar quantidade digna de nota dos resíduos, foi pensada em uma estratégia de investigação que fornecesse dados contínuos e de forma rápida e baixo custo para fazer uma varredura desses locais e de fato confirmar a existência ou não dos resíduos.

Foi escolhido o equipamento OhmMapper pela sua característica de varredura do terreno com grande densidade de dados e pela sua velocidade de aquisição, uma vez que os dados precisam ser adquiridos de forma rápida durante a maré baixa. Os primeiros testes foram realizados na Praia de Pontal do Cupe, na região de Porto de Galinhas, município de Ipojuca-PE (**Figura 1**). Nessa praia chegaram manchas esparsas de óleo em

outubro de 2019, que foram recolhidas rapidamente. Algumas marcas do óleo podem ser visualizadas nas paredes e muros das residências.

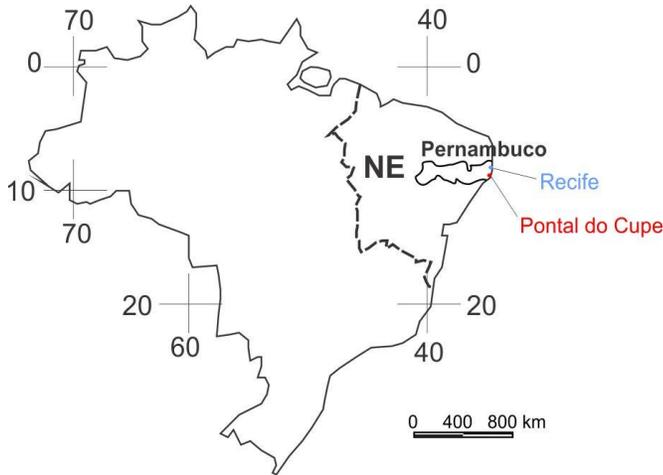


Figura 1 – Localização da área de ensaios.

Metodologia

A metodologia tradicional de medição de resistividade é baseada na transmissão de uma corrente contínua (DC) na superfície do terreno através de dois eletrodos, com o potencial resultante sendo observado por dois eletrodos adicionais. É um método tradicionalmente utilizado em estudos ambientais, porém com resolução regular e tempo de aquisição relativamente alto para ensaios de varredura de sítios contaminados. Com a demanda por tecnologias de alta resolução e alta velocidade de aquisição, foi desenvolvido o Método Resistivo Capacitivo. Este método, também chamado Resistividade Capacitiva (CR, do inglês, “*Capacitive Resistivity*”), se apresenta como uma forma de se utilizar uma metodologia de resistividade elétrica sem a necessidade de se fazer o contato por meio de cravação do eletrodo com a superfície do terreno. Além disso, ele permite uma contínua aquisição de dados, possibilitando a investigação de grandes áreas com rápida operação de campo (Kuras et al., 2005, Kuras et al., 2011, Pan et al., 2014, Loke et al. 2013).

Para o Método CR, também o arranjo dipolo-dipolo e suas variações tende a ser a geometria mais favorável para a aquisição de dados. O mecanismo de acoplamento entre o sensor e a superfície é predominantemente capacitivo, o efeito indutivo é negligenciável. Sob condições quasi-estáticas, as medidas capacitivas são essencialmente equivalentes ao método tradicional.

Um dos sistemas de que trabalha com a resistividade capacitiva é o OhmMapper, da Geometrics. Esse sistema é composto pelo transmissor e os receptores, bem como o registrador dos dados. Os receptores estão ligados entre si através de cabos dipolares, e o transmissor é

ligado ao sistema de recepção por meio de uma corda não-condutora. Todo o conjunto é arrastado na superfície do terreno facilmente por um operador.

Por ser um método relativamente novo, é importante estudar mais atentamente alguns aspectos teóricos para garantir que os dados coletados sejam confiáveis. Um aspecto importante é a atenuação do sinal. Considerando que o arranjo é análogo ao de resistividade convencional, a separação entre o transmissor e o receptor terá influência na atenuação do sinal. Segundo Kuras (2002) a resistividade elétrica do terreno também influencia na atenuação do sinal e na profundidade de investigação do método de Resistividade Capacitiva ocorrendo diferença de penetração da corrente elétrica emitida em terrenos mais resistivos ou mais condutivos. Em locais mais resistivos a voltagem nos receptores tende a ser mais elevada, favorecendo as medições e possibilitando uma maior profundidade de penetração. No caso de locais de condutividade muito alta, a voltagem será baixa, dificultando as leituras para maiores distâncias transmissor-receptor.

Dentro deste contexto, outra condição relevante para aplicabilidade do método em questão se refere ao fato que a separação entre o conjunto transmissor e o receptor deve ser influenciada pelos efeitos do parâmetro denominado *skin depth* (d), que se relaciona com a profundidade de penetração e está associado à atenuação do campo elétrico. O *skin depth* se relaciona à profundidade na qual a intensidade do sinal é atenuada de 37% do seu valor original e de acordo com Timofeev et al. (1994) é calculado por:

$$d = 15,9 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

onde ρ é a resistividade elétrica do meio em ohm.m e f é a frequência do sinal emitido em kHz.

Na equação fica claro que quanto menor a resistividade do local, menor será a penetração e, portanto, o método funcionará apenas para pequenas aberturas transmissor-receptor. O OhmMapper funciona com uma frequência fixa de 16,5 kHz, dessa forma pode-se estimar o *skin depth* para um determinado valor de resistividade. O valor encontrado será o maior espaçamento transmissor-receptor permitido para que o método funcione.

Em terrenos muito condutores, como é o caso de praias, essa condição pode limitar ou mesmo inviabilizar o funcionamento do método. O transmissor usa a capacitância de seu cabo dipolar para enviar o sinal AC de aproximadamente 16,5 kHz para o terreno. Como a capacitância varia diretamente com o comprimento do cabo, pode ser usado um cabo de maior comprimento para ter maior capacitância e assim transmitir mais corrente ao terreno (Halihan et al., 2009).

Ensaio realizado e resultados

Como referido anteriormente, foi utilizado o método CR com o equipamento OhmMapper para confirmar que não existia mais óleo nas praias atingidas pelo acidente, uma vez que os métodos diretos fizeram análises somente em alguns pontos das praias. Dessa forma com o OhmMapper foram programadas linhas de varredura entre 150 e 200 metros de comprimento e distância de 10 metros entre as linhas.

Os primeiros testes foram executados na Praia de Pontal de Cupe, Município de Ipojuca-PE. Foram feitas duas linhas paralelas de 150 metros de comprimento, como mostrado na **Figura 2**.



Figura 2 – Linhas de ensaio na Praia do Pontal do Cupe.

Como o ambiente de praia é extremamente condutor, os parâmetros de aquisição definidos a princípio apresentaram limitações. Esses parâmetros eram cabos dipolares de 5 metros e distâncias entre transmissor e receptor de 1,25, 2,5 e 5,0 metros, suficiente para investigar os sedimentos até uma profundidade máxima de 2,8 metros. Como a espessura de sedimento retrabalhada pelas marés na região é estimada em 1 metro, essa configuração permitiria a investigação da região de possível ocorrência de resíduos.

Durante a aquisição o equipamento conseguiu fazer o acoplamento transmissor-receptor, mas as leituras já indicavam a necessidade de aumento excessivo de ganho. E devido ao efeito de *skin depth* do meio muito condutor, a distância transmissor-receptor de 5 metros não funcionou. Os perfis foram realizados, mas a análise dos dados brutos já mostrou dados extremamente ruidosos e, portanto, de baixa qualidade. Essa análise foi feita por meio de uma função de verificação de qualidade dos dados do software de inversão RES2Dinv (Geotomo Software, 2007), na qual é possível visualizar dados muito ruidosos e excluí-los. A **Figura 3** mostra a tela de verificação de qualidade dos dados da Linha 1 com cabos dipolares de 5 metros.

Pode ser observado que os dados são extremamente ruidosos, não sendo possível distinguir sinal de ruído. Mesmo assim é possível fazer a inversão dos dados, como pode ser observado na Figura 4. Os resultados mostram uma grande variação de resistividade no perfil, com locais de altas resistividades (acima de 300 ohm.m) que poderiam ser erroneamente interpretados como

possíveis ocorrências de resíduos, mostrando a importância da análise dos dados antes do processo de inversão.

Em razão dessa dificuldade devido ao ambiente condutor, foi adotada uma nova configuração, com cabos de 10 metros e distâncias transmissor-receptor de 1,25, 2,5 e 5,0 metros. O cabo dipolar mais longo transmite mais corrente ao solo permitindo assim um acoplamento adequado. Os resultados ficaram muito melhores, como pode ser visto na **Figura 5**.

Os resultados da inversão dessa linha são mostrados na **Figura 6**. Nessa figura pode ser observada, de forma clara, uma seção de resistividade coerente com o ambiente geológico. Na parte mais superficial ocorre uma camada com resistividade acima de 10 ohm.m, que caracteriza o sedimento arenoso úmido, mas não saturado. Mas abaixo é possível observar uma superfície de separação de um meio bem mais condutor, abaixo de 2 ohm.m. Essa zona caracteriza o sedimento arenoso saturado pela água salgada. A água do mar, que tem resistividade da ordem de 0,2 ohm.m, faz com que a resistividade diminua dessa forma.

Conclusões

O Método RC é bastante adequado para ensaios ambientais onde é necessário se fazer uma varredura do terreno para busca de fontes de contaminação. Por ser um método com alta cobertura de área e de rápida aquisição de dados, é especialmente adequado para ambientes litorâneos onde as variações do nível do mar ocasionadas pelas marés podem limitar o uso de métodos convencionais.

Por outro lado, as características físicas de operação do método precisam ser respeitadas para que se obtenham resultados confiáveis. Esse trabalho mostra que em ambientes muito condutores os efeitos de *skin depth* limitam o uso do arranjo com cabos dipolares de 5 metros, resultando muitas vezes em dados extremamente ruidosos. Por outro lado, o uso de cabos dipolares maiores, de 10 metros, possibilita o aumento da corrente transmitida ao solo e permite que o equipamento funcione com bons resultados, mesmo nessa condição de terreno.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP e a Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE pelo financiamento do projeto (Processo 2020/03711-9).

Referências

Bontempo Filho, E.B.; Coutinho, R.Q.; Barbosa, J.A.; Barcellos, R.L.; Giacheti, H.L. & Ramos, G.M.S. 2022. Temporal monitoring of contamination in three sandy beaches from the 2019 oil spill near Cabo de Santo Agostinho, Northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (2022) 94(Suppl. 2): e20210513 DOI 10.1590/0001-3765202220210513.

Geotomo Software (2007) RES2DINV. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares methods. User's manual, p 138.

Halihan, T.; Mace, C. & Sickbert, T. 2009. Geophysical Investigation Of Petroleum Contaminated Ground Water Using Electrical Resistivity. DEQ Cyril Project. Oklahoma Department of Environmental Quality. Land Protection Division, Site Remediation Section. Oklahoma City, Oklahoma. p. 26.

Kuras, O., 2002. The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface: Ph.D. thesis, University of Nottingham. 286 p.

Kuras, O., Beamish, D., Meldrum, P.I., Ogilvy, R.D., 2006. Fundamentals of the capacitive resistivity technique, *Geophysics*, 71 (3), p. G135-G152.

Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., Wilkinson, P.B., 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method, *Journal of Applied Geophysics*, 95, p. 135-156.

Pan, L., Adamchuk, V.I., Prasher, S., Gebbers, R., Taylor, R.S., Dabas, M., 2014. Vertical soil profiling using a galvanic contact resistivity scanning approach, *Sensors (Switzerland)*, 14 (7), p. 13243-13255.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, 2019. Manchas de Óleo Litoral do Nordeste. Access in: 15/06/2022. <http://www.ibama.gov.br/manchasdeoleo>.

Timofeev, V. M.; Rogozinski, A. W.; Hunter, J. A.; Douma, M., A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)*, Environmental and Engineering Geophysical Society, p. 701–715, 1994.

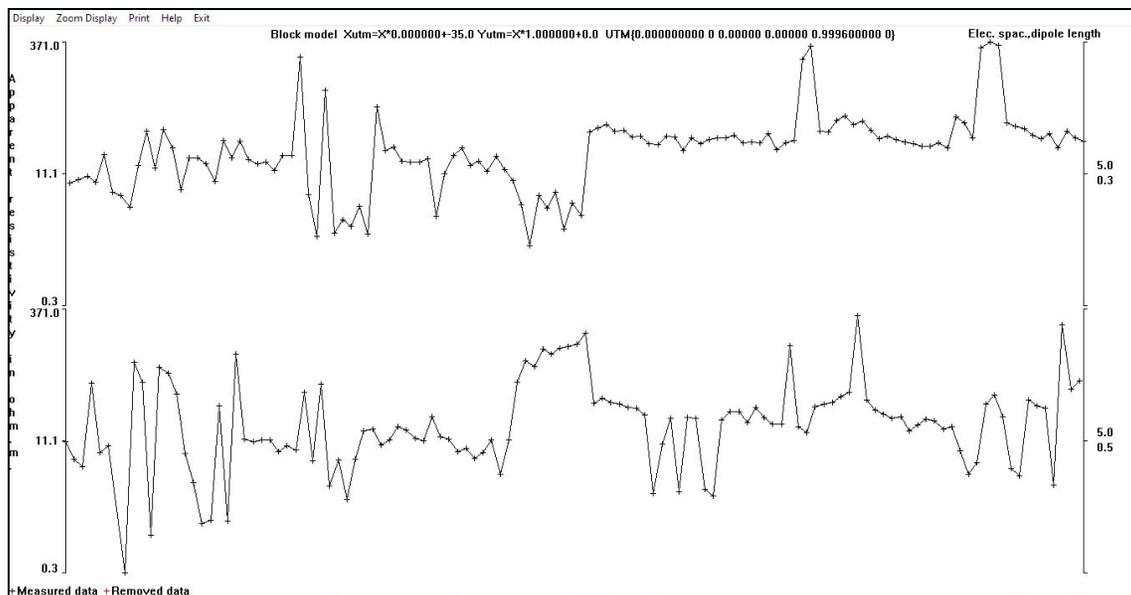


Figura 3 – Dados brutos de resistividade aparente da Linha 1 com cabos de 5 metros.

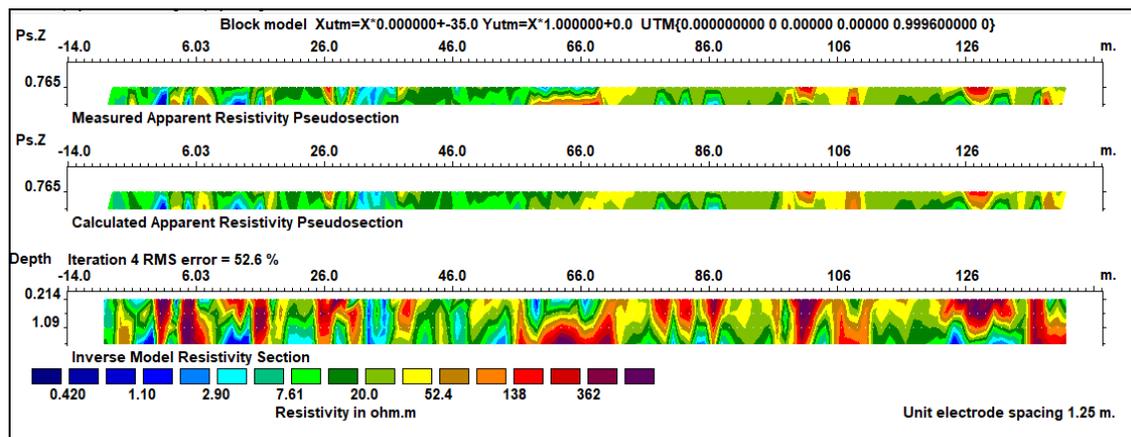


Figura 4 – Resultado de inversão da Linha 1 com cabos de 5 metros.

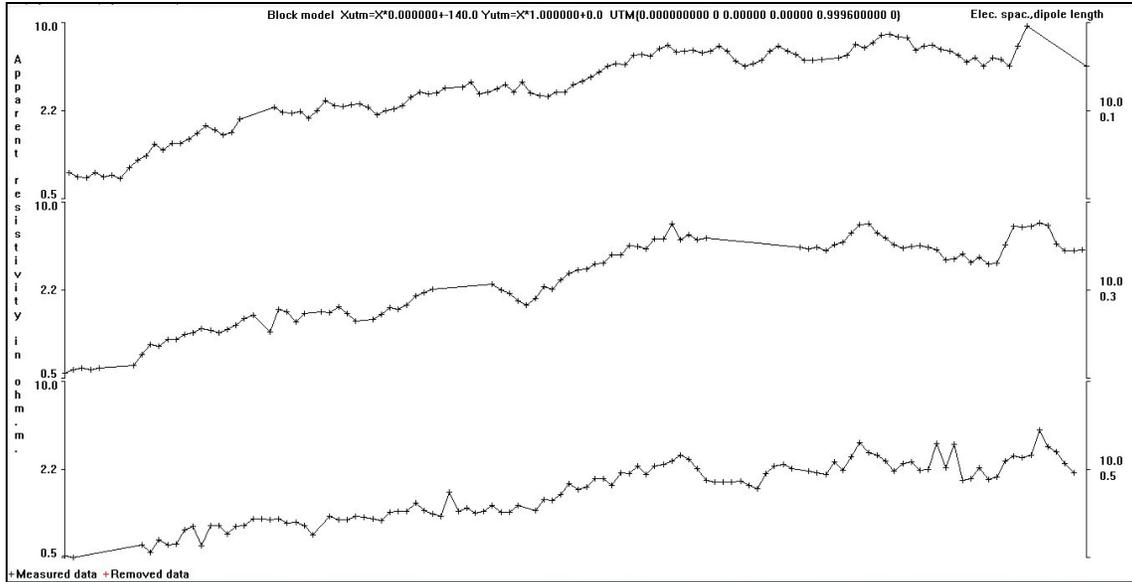


Figura 5 - Dados brutos de resistividade aparente da Linha 1 com cabos de 10 metros.

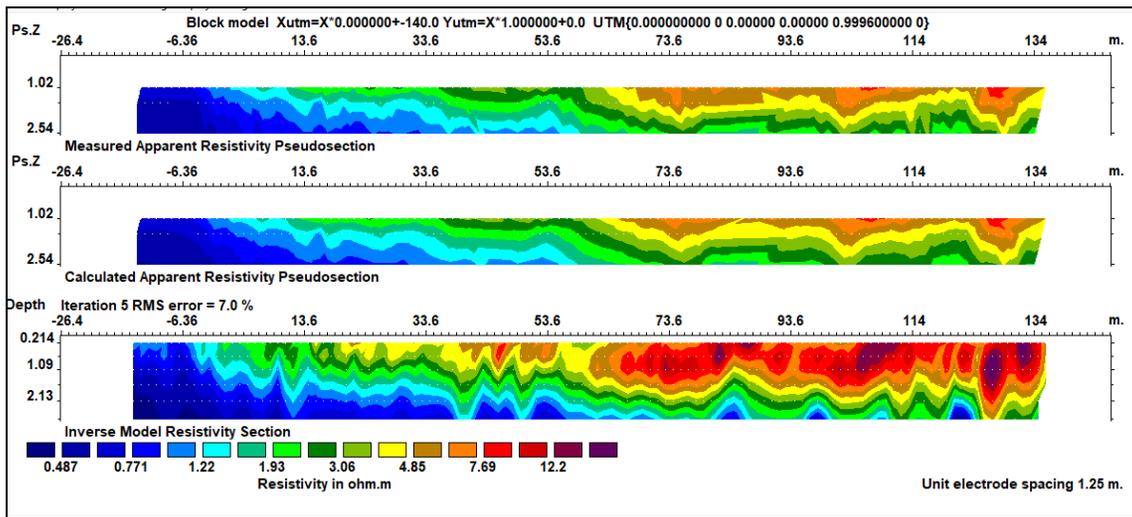


Figura 6 – Resultado de inversão da Linha 1 com cabos de 10 metros.