

## Investigações geolétricas para orientar à exploração de barita na região de Tunas do Paraná, PR: Resultados preliminares

Ícaro Augusto Pachêco \* (USP), Jorge Luís Porsani (USP), Nathália de Souza Penna (USP), Victor Hugo Hott Costa (USP) & Marcelo Cesar Stangari (USP)

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

Investigações geolétricas foram empregadas para orientar a exploração de um depósito de barita por uma Mineração de Pequena Escala (MPE), localizada em Tunas do Paraná, PR. Os dados foram adquiridos ao longo de 16 perfis com o objetivo de caracterizar o depósito e auxiliar o planejamento de lavra. Nesse trabalho, o foco foi os dados de resistividade, polarização induzida no domínio do tempo e no domínio da frequência em dois perfis. Os resultados preliminares mostraram resistividades acima de 17000 ohm.m para alvos de barita; cargabilidade acima de 17 mV/V foram encontradas próximos a possíveis zonas de falhas. As anomalias de Percent Frequency Effect (PFE-) e Fator Metal (FM) tiveram correlação com as anomalias de cargabilidade e coincidiram espacialmente.

### Introdução

O Sulfato de Bário ( $BaSO_4$ ), denominado como Barita, é usado principalmente na indústria petrolífera. As suas propriedades como alta abrasividade, inércia química e alta densidade ( $4,3-4,6 \text{ g/cm}^3$ ) permitem o controle da densidade do fluido de perfuração, mantém a pressão hidrostática e evita a penetração da lama em rochas permeáveis. Além disso, a Barita é utilizada na indústria de radiologia, na preparação de tintas, pigmentos, vernizes, vidros, dentre outros (Braz, 2022).

Segundo o anuário mineral brasileiro da DNPM (Brasil, 1997-2000), as reservas oficiais de barita diminuíram por volta de  $507,5 \cdot 10^6 \text{ t}$  para  $81,5 \cdot 10^6$  toneladas entre os anos de 1997 e 2020. Essa redução na produção, dentre outros motivos, ocasionou o fechamento de várias reservas por razões econômicas. Hoje, os depósitos mais expressivos do Brasil estão localizados na Bahia, sendo que outras reservas, como as do Paraná, são de menor porte e apresentam dificuldades de beneficiamento.

Esse trabalho situa-se em um contexto de Mineração de Pequena Escala (MPE) no município de Tunas do Paraná, próximo a Curitiba e pretende auxiliar no planejamento e sequenciamento de lavra em depósito de Barita. As MPE's normalmente carecem de pesquisa por falta de recursos financeiros e desconhecimento dos métodos científicos de pesquisa. Portanto, este trabalho visa avaliar os métodos de resistividade e polarização

induzida (IP) na pesquisa de barita. Esses resultados irão auxiliar no planejamento de lavra e conseqüentemente reduzir custos, aumentar a produtividade e ampliar o número de locais a serem explorados.

A área de estudo está situada na parte central do contexto geotectônico da Província Mantiqueira, dentro do cinturão orogênico da faixa do Ribeira, mais precisamente no Vale do Ribeira (Almeida, 1977). Essa região apresenta interesse econômico principalmente devido os depósitos polimetálicos com produção de ouro, prata, zinco, chumbo, barita e fluorita, com os dois últimos em menor escala. A Figura 1 mostra o contexto geológico que a área está inserida e a disposição das duas linhas analisadas, i.e., as linhas 1 e 2.

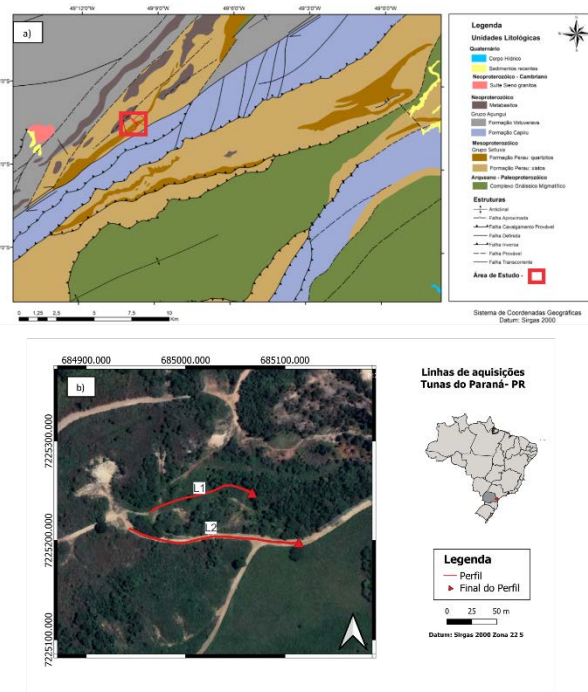


Figura 1 - a) Mapa Geológico com a área de estudo. (Fonte: Lasmar F., 2020, adaptado de Silva et al., 1999). b) Área de estudo com as duas linhas de aquisição.

### Geologia local

O depósito aqui estudado, da formação Perau do Grupo Setuva (figura 1), é do tipo SEDEX com gênese exalativo vulcano sedimentar de natureza distal. Ele é formado por meio de deposição de barita e sulfetos em bacias sedimentares de fundo oceânico. Esse processo ocorre

por meio da percolação de fluidos hidrotermais marinhos em falhas e rochas permeáveis que transportam os minérios para o assoalho e para a periferia da falha principal (Robb, 2013). O depósito é estratiforme, com camadas de sulfetos de Cu, Zn e Pb e lentes de barita, da base para o topo sendo o Zn e Pb distribuídos de forma mais aleatória (Lydon, 2004). Apesar das camadas não serem contínuas, elas são concordantes com o S<sub>0</sub> do xisto, que segue a direção preferencial NNW-NNE (Silva, 1990). Como dito anteriormente, o depósito é distal e além de um zoneamento estratigráfico vertical, há um zoneamento lateral em relação à zona de falha, sendo a região proximal rica em Cu, Pb e Zn e a distal rica em barita, podendo ter uma região mais distal rica em óxido de ferro, como descrito na figura 2 (Emsbo, 2016).

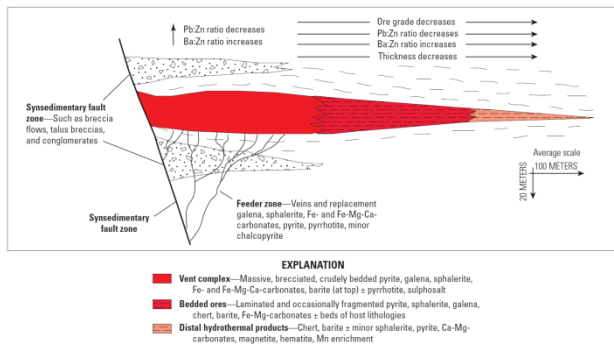


Figura 2 - Seção demonstrativa da morfologia e distribuição do minério e elementos Fe, Mg, Ca, Pb, Zn, Ba e Mn para um depósito SEDEX (Fonte: Emsbo, 2016, adaptado de Lydon, 2004).

**Metodologia**

As metodologias aplicadas foram a Eletroresistividade, a Polarização induzida no domínio do tempo e no domínio da frequência. Durante o projeto foram realizadas aquisições geofísicas ao longo de 16 linhas, porém esse trabalho abordará apenas os resultados das linhas 1 e 2, que são aproximadamente paralelas. Elas foram realizadas com o intuito de avaliar a eficácia dos métodos em caracterizar o depósito de Barita ilustrado na Figura 2. A meta é auxiliar na elaboração de um modelo conceitual de cava, delimitar os alvos e demonstrar como a metodologia geofísica pode contribuir para aumentar a eficiência dos empreendimentos de MPE, torná-los mais sustentáveis e difundir o conhecimento.

Battacharya (1974) adquiriu dados de resistividade e gravimetria na Índia. O autor demonstrou que os locais com grandes corpos de barita causam anomalias de alta resistividade. Além disso, apesar da barita apresentar densidade alta, o método gravimétrico não é uma boa opção, pois a maior parte dos corpos mineralizados apresentam pequenas dimensões, embora em corpos de grandes dimensões o método é eficaz.

Lasmar (2020) utilizou métodos geoeletricos na identificação de corpos de barita na mesma região desta pesquisa. O estudo da autora mostrou que os valores de

resistividade obtido sobre afloramentos conhecidos de barita apresentaram valores superiores a 12000 ohm.m, chegando a valores maiores que 20000 ohm.m. Esses valores de anomalia para a barita foram superiores a de alguns estudos como o de Ehirim (2016), que sugeriu valores entre 1500 e 5500 ohm.m, que de fato é baixo e não seria suficiente para discriminar o minério de interesse de outros materiais como o quartzo. Além disso, a autora deixa claro que os valores de IP não caracterizam os corpos de barita e sim as regiões do depósito com sulfetos disseminados. Os dados de IP não foram tão satisfatórios no trabalho da autora devido à baixa profundidade alcançada com espaçamento mínimo entre dipolos de 4 metros. A profundidade proposta para as camadas metálicas foram de aproximadamente 20 metros da camada de barita.

Para a linha 1 foram adquiridos dados de resistividade, IP no domínio do tempo com período de interrupção de corrente igual a 4 segundos com eletrodos metálicos. Visto que esses eletrodos não são os mais apropriados para a obtenção de produtos do domínio do tempo (mV/V) devido a polarização de eletrodo, dados em duas frequências distintas (0,5 e 0,250 Hz) foram obtidos para produção de resultados no domínio da frequência com produtos de Percent Frequency Effect (PFE) e Fator Metal (FM). A distância mínima entre eletrodos foi de 10 metros e o comprimento da linha foi de 150 metros.

Para a linha 2 foram obtidos os mesmos produtos da anterior, porém, o espaçamento mínimo entre eletrodos foi de 5 metros e o comprimento total foi de 210 metros. As equações utilizadas para os resultados de PFE e FM são dadas por:

$$PFE = 100 \times \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_1} \quad Eq. 1$$

$$FM = PFE \times \frac{2\pi 10^3}{\rho_0} \quad Eq. 2$$

Sendo que ρ<sub>0</sub> é a resistividade para a menor frequência e ρ<sub>1</sub> para a maior frequência. Os dados de resistividade e cargabilidade foram filtrados e a topografia foi ajustada quando necessária no programa *Prosys II* e invertido no *software Res2Dinv*, ambos da *Iris Instrument*. Os dados de PFE e FM foram gerados por meio das equações 1 e 2 a partir das resistividades obtidas nas duas frequências por meio de uma planilha *Excel* da *Microsoft*, filtrados no *prosys* e invertidos no *Res2Dinv*. A inversão foi realizada com o tamanho de células igual a metade do espaçamento dos eletrodos para a linha 2 pois a mesma apresentou grandes variações de resistividade e foi o modelo que melhor se ajustou, para ambas as linhas o processo foi realizado pelo método dos mínimos quadrados e com inversão robusta.

O programa *Oasis Montaj* da *Geosoft* foi utilizado como auxílio na obtenção de uma interpolação mais complexa, que ajudou na visualização e interpretação dos dados. A aquisição dos dados foi obtida com o instrumento *Syscal Pro 10* canais da *IRIS Instrument* e com cabos construídos pelo Laboratório de Geofísica aplicada do

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP).

### Resultados Preliminares

O resultado de resistividade para a linha 1 foi de 100-1000 ohm.m para a primeira camada que possivelmente está relacionado com o solo e o saprolito. O material mais resistivo foi de 2000 ohm.m que pode ser o xisto. Uma zona de descontinuidade de material foi encontrada entre 70 e 90 metros de distância, que pode ser uma zona de falha. Não foram obtidos resultados que caracterizam uma zona rica em barita (Figura 3-a).

Para a cargabilidade no domínio do tempo os maiores valores foi na ordem de 16 mV/V em 20 metros de profundidade do início da linha até ~ 80 metros de distância. Esses altos valores sugerem uma região estratificada com maior incidência de mineralização sulfetada (Figura 3-b).

Para o resultado de PFE, os maiores valores foram maiores que 1,7% e coincidiram com a posição das anomalias de alta cargabilidade (mV/V), com comportamento planar em profundidades maiores que 20 metros (Figura 3-c).

No resultado de FM, as altas anomalias foram maiores que 10,7 FM. Esse resultado não foi tão planar quanto os anteriores possivelmente por questões de interpolação. Porém, coincidiu espacialmente com os maiores valores próxima a possível zona de cisalhamento e na região distal. A anomalia foi interpretada como contínua ou muito próxima disso devido os dados anteriores (Figura 3-d).

O resultado para resistividade na linha 2 apresentou valores maiores que 15000 ohm.m que podem ser regiões ricas em barita. Essas regiões estão posicionadas entre 60 e 70 m de distância em aproximadamente 2,5 m de profundidade; entre 130-135 m e 5 m de profundidade e por fim entre 160-180 m. Entre a distância 110 e 125 m há uma região com resistividade menor que as periferias, na ordem de 4000 ohm.m que pode estar relacionada com uma zona de falha (Figura 4-a).

Os maiores valores de cargabilidade foram na ordem de 17 mV/V. Esses valores coincidem com a posição da possível falha, podendo estar deslocada e posicionada na região periférica no lado esquerdo da mesma (Figura 4-b).

O PFE apresentou valores menores que o da linha anterior, aproximadamente 0,15 %, porém a anomalia também coincide com as regiões de maior cargabilidade (Figura 4-c). O resultado para FM também apresentou menores valores (2,7 FM) que o da linha anterior, mas coincide com os maiores valores de cargabilidade com uma zona alta em 40 metros de distância (Figura 4-d).

### Discussão e Conclusões

Os dados de resistividade foram úteis para inferir a possível presença de barita, sendo que na linha 1 não foi encontrado anomalia típica de tal material e na linha 2 foram encontradas três zonas anômalas. Todas as anomalias inferidas como possível presença de barita estão rasas (<5m).

As anomalias de alta cargabilidade estão posicionadas em regiões mais profundas, acima de 20 metros, para a linha 1 e próxima a possível zona de cisalhamento para a linha 2.

Os dados de IP no domínio do tempo são adquiridos com eletrodos porosos para evitar o efeito de polarização de eletrodo e evitar interpretações ambíguas sobre possíveis anomalias. O IP no domínio da frequência foi realizado com o intuito de comparar as posições das anomalias e inferir se o resultado faz sentido. Sendo assim, os valores altos coincidiram para os três tipos de resultados (cargabilidade, PFE e FM), que sugere que os dados de cargabilidades não sofreram tanto com a polarização de eletrodos. A ressalva está no FM da linha 2 que apresentou valores maiores em regiões onde a resistividade, a cargabilidade e o PFE foram intermediários, próximo a 40 metros de distância.

Os valores de cargabilidade para as duas linhas foram bem similares, inclusive as altas cargabilidades, por volta de 20 mV/V, o que não é um valor tão alto, por exemplo, para a exploração de ouro, mas que indica a presença de possíveis zonas mineralizadas de sulfetos disseminados.

A posição dos alvos estudados está de acordo com o modelo do depósito SEDEX, proposto na Figura 2 e nas observações da Lasmar (2020). Ou seja, na linha 1 as camadas sulfetadas inferidas são planares e profundas, por volta de 20 metros. Na linha 2 elas estão na região proximal da falha, ao passo que os dois maiores corpos de barita estariam nas regiões distais, com distâncias maiores que 40 metros da zona de cisalhamento.

Portanto, a premissa de que os dados geoeletricos fornecem bons resultados para o estudo do depósito SEDEX foi validada. A pesquisa pode auxiliar no planejamento de exploração de barita já realizada no local com a pontuação dos alvos do sulfato de bário. Além disso, as zonas mineralizadas com sulfetos disseminados também podem ser identificadas caso a exploração desse material seja de interesse.

A utilização de dados adquiridos para outros métodos como o GPR e resistividade capacitiva também devem ser utilizadas. A confirmação da eficiência desses dois últimos métodos na caracterização e identificação da barita poderá ajudar na logística devido a maior praticidade quando comparada com a eletrorresistividade. A utilização do método IP é a mais positiva e talvez a única na identificação de corpos sulfetados e deverá ser usada apenas caso haja o interesse em identifica-las.

Por fim, recomenda-se a continuidade da pesquisa com um produto final em 3D onde pode ser observada a forma do depósito, visto que na prática ele não se comporta de

forma tão exata como o proposto na Figura 2. Esses resultados, portanto, poderá ajudar no planejamento e sequenciamento de lavra, reduzindo custos e aumentando a produtividade.

### Agradecimentos

IAP agradece à CAPES pela bolsa de pesquisa de mestrado. JLP agradece ao Sr Pedro Marques da Costa (Mineração Patrimônio) e à FAPESP-Fundação de Apoio à Pesquisa no Estado de São Paulo (2020/15796-9) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa, e ao CNPq (304104/2021-3) pela bolsa de pesquisa. Ao Departamento de Geofísica (IAG/USP) pela infraestrutura necessária para o desenvolvimento desta pesquisa. Aos colegas da Pós-Graduação pela ajuda na aquisição dos dados.

### Referências

- Almeida, F. F. M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B. B.; Fuck, R.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, Campina Grande/PB, Atas, pp. 363-391.
- Bhattacharya, B. B., Jain, S. C., & Mallick, K. 1974. Geophysical prospecting for barite. *Geophysical Prospecting*, 22(3), 421-429.
- Brasil, 1997-2000. Anuário Mineral Brasileiro. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral, Sumário Mineral. Brasília, DNPM.
- Braz, E. 2002. Análise da adequação do mercado produtor de barita e de bentonita para perfuração de poços de petróleo. *XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Anais*, 2, 10-17.
- Ehirim, C. N., Ebeniro, J. O., & Ofoegbu, C. O. 2016. Baryte mineral exploration in parts of the lower Benue Trough, Nigeria. *International Journal of Physical Sciences*, 11(21), 279-286.
- Emsbo, P., Seal, R. R., Breit, G. N., Diehl, S. F., & Shah, A. K. 2016. *Sedimentary exhalative (sedex) zinc-lead-silver deposit model* (No. 2010-5070-N). US Geological Survey.
- Lasmar, F. P. (2020). *Utilização de métodos geoeletricos para identificação de corpos de barita na região do Vale do Ribeira*. Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado.
- Lydon, J. W., Deb, M., & Goodfellow, W. D. 2004. Genetic models for Sullivan and other SEDEX deposits. *Sediment-Hosted Lead-Zinc-Sulphide Deposits Narosa Publishing House New Delhi*, 61, 149-190.
- Robb, L. 2013. *Introduction to ore-forming processes*. Blackwell Publishing.
- Silva, A. C. G. A. 1990. A Jazida de Barita de Água Clara no âmbito do Precambriano do Vale do Ribeira, Estado do Paraná. Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado.

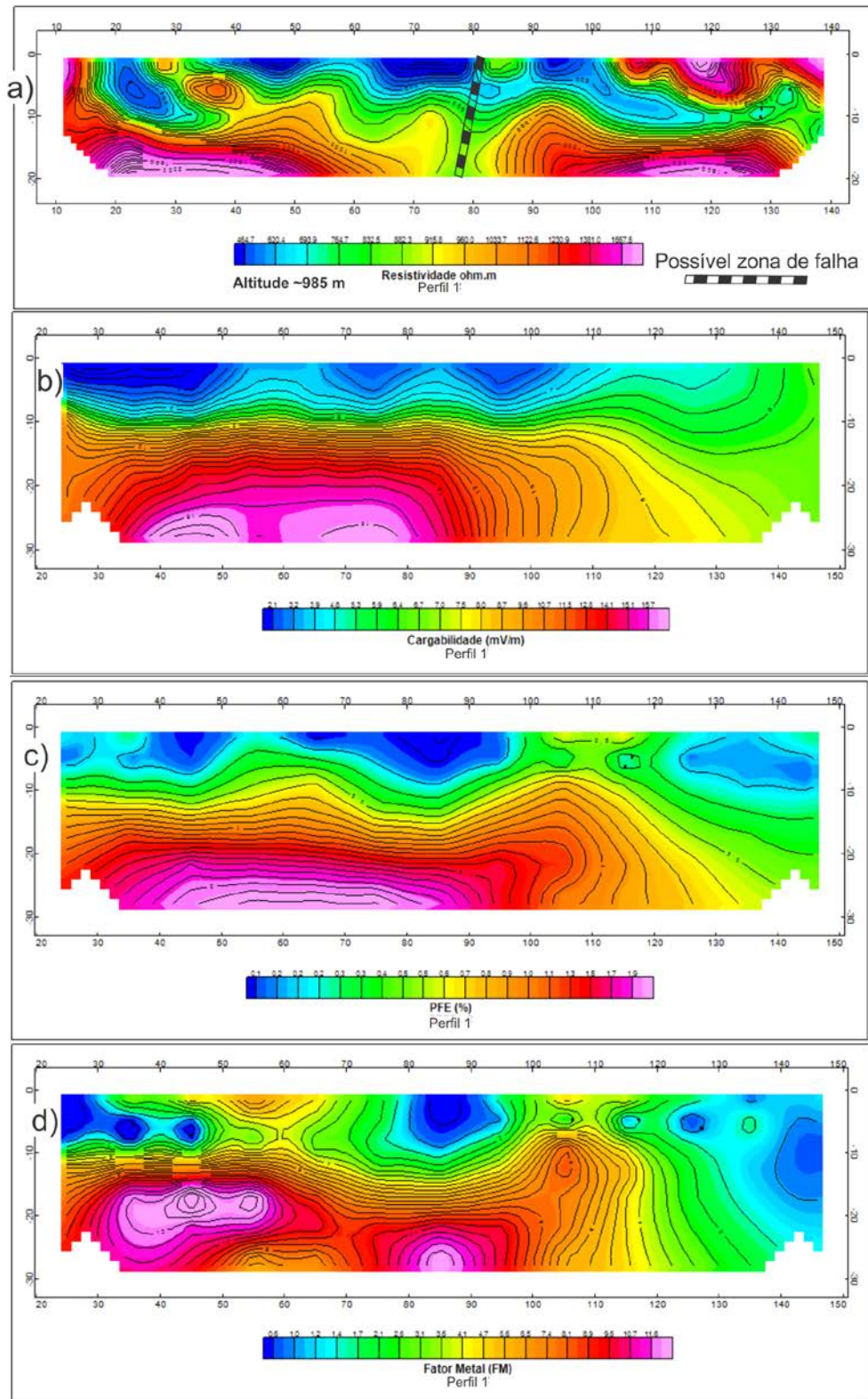


Figura 3 – Resultado da Linha 1: a) Modelo de resistividade; b) Cargabilidade; c) PFE; d) Fator Metal.

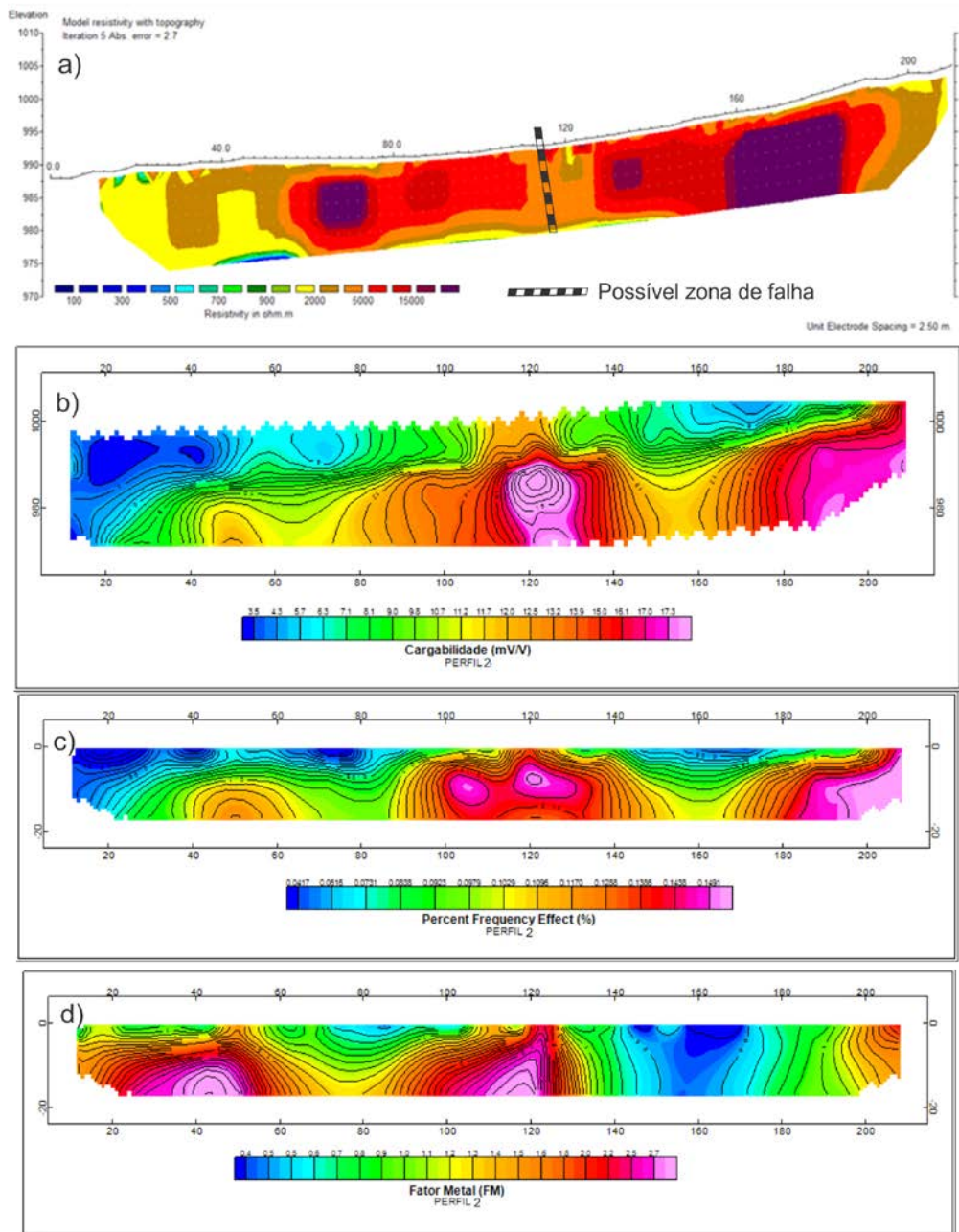


Figura 4 – Resultado da Linha 2: a) Modelo de resistividade; b) Cargabilidade; c)PFE; d) Fator Metal.