



Anomalias de Fator Metal associada à ocorrência de Cobre sulfetado estruturalmente controlado

Lenon Melo Ilha¹, César Augusto Moreira², Camila Schweig³

^{1,3} Universidade Estadual Paulista – UNESP

² Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th 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

This paper presents the results of the Electrical Resistivity and Induced Polarization geophysical methods applied in mineral occurrence area of copper sulphites. They were measured the parameters electric resistivity and chargeability, through the technique of electric profiling, with willing lines in surface of the azimuthal form. The area is located in the rural zone of the Caçapava do Sul city (RS), inserted in the Camaquã sedimentary basin, formed by sedimentary and vulcanogenics stratigraphics units, locally characterized by medium to coarse arkosic sandstone, intensely cemented and recrystallizeds, with azurite and malachite presents in fractures. Structural measures were accomplished in fractures that resulted in the definition of two assemblages (N18° and N112°). The line N6° crosses the N112° fractures assemblage and it presents anomaly of high intensity in depth, in contrast with N96° line that crosses the N18° assemblage and it describes the presence of anomaly of very high intensity in depth. The field acquisition in azimuthal format made possible the elaboration of 3D model and that elucidates clearly form, anomalous areas associated the carbonates presence in surface and sulfides in depth. The crossing between the geophysical result and structural measures allowed determine the mineralization directions principals.

Introdução

O cobre nativo é encontrado difundido na natureza sob a forma de filões, mas, usualmente, em quantidades pequenas. É encontrado, comumente, nas zonas oxidadas dos depósitos de cobre, associado à minerais como cuprita, malaquita, azurita, calcopirita e pirita.

O maior consumidor do minério de cobre é a indústria metalúrgica, principalmente em produtos para a construção civil e para o segmento de cabos e fios.

Estudos de prospecção e pesquisa mineral são fundamentais para o reconhecimento e incorporação de novas reservas, em atendimento a uma demanda crescente tanto para o mercado interno, quanto para exportação e equilíbrio da balança comercial. As ferramentas disponíveis compreendem métodos diretos (sondagem, amostragem de solo e rocha, análises químicas) e indiretos (análise de sensores remotos, métodos geofísicos).

Devido ao baixo custo em relação aos métodos diretos e a possibilidade de cobertura de amplas áreas, as técnicas geofísicas constituem uma importante ferramenta em pesquisa mineral.

Dentre os diversos métodos geofísicos passíveis de aplicação em estudos de prospecção e pesquisa mineral de sulfetos e minerais metálicos, os métodos elétricos e eletromagnéticos são amplamente utilizados.

A aplicação de métodos elétricos possibilita a caracterização de depósitos minerais a partir de anomalias em parâmetros físicos como cargabilidade e resistividade, devido ao contraste frequentemente apresentado entre a rocha encaixante e o corpo mineralizado.

O método de Eletroresistividade possui aplicação em pesquisas de cobre disseminado devido a característica de baixa resistividade elétrica deste metal, frequentemente contrastante em relação a rochas ao redor. O método de Polarização Induzida é amplamente aplicado neste tipo de pesquisa devido a elevada polarizabilidade dos sulfetos disseminados no ambiente geológico, este método foi desenvolvido e aperfeiçoado essencialmente para prospecção e pesquisa de sulfetos disseminados. O parâmetro fator metal permite uma correlação entre os parâmetros resistividade elétrica e cargabilidade e, em determinados casos, possibilita uma caracterização efetiva de anomalias polarizáveis.

O trabalho de White et al (2001) realizou um levantamento de Polarização Induzida (IP) em uma mina de Cobre, denominada Copper Hill, e utilizaram a técnica de modelagem 3D com dados de inversão. Esta mina está associada a alterações hidrotermais. As zonas mineralizadas ocorrem em rochas vulcânicas e acompanham os veios e fraturas, este depósito se enquadra no sistema cobre pórfiro. A modelagem 3D definiu duas falhas com tendências norte-sul e duas tendências aproximadamente leste-oeste formando uma zona de alta cargabilidade. Resultados geoquímicos realizados na área indicam a existência de 0,72% de Cobre e 1,62 g/ton de Ouro, estes dados foram coletados em zonas que apresentaram altos valores de cargabilidade.

O trabalho de Irvine & Smith (1990) realizou levantamentos de Polarização Induzida e Eletroresistividade na mina de ouro McLaughlin, Califórnia (USA). Todas as rochas do depósito sofreram alteração hidrotermal, com forte controle estrutural da mineralização. A rocha encaixante é um serpentinito, caracterizado por carbonatação e argilização, além de andesitos e sedimentos silicificados e sericitizados. A maior parte do depósito é constituída por quartzo, veios de calcedônia e grande quantidade de pirita associada a ouro. Foram realizados duas seções, com áreas de elevada resistividade associadas a presença de quartzo e

forte anomalia de cargabilidade próximo a superfície, que tende a diminuir de intensidade em profundidade, semelhante ao ocorrido com a resistividade. A associação entre pirita e ouro e a ocorrência de ambos em veios de quartzo, limita o depósito as porções mais rasas da área.

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo geofísico e estrutural realizado numa ocorrência de cobre disseminado, a partir dos métodos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida, por meio da técnica de caminhamento elétrico. As linhas foram dispostas de forma azimutal, com centro coincidente com a ocorrência mineral aflorante.

Área de Estudos

A área de estudos está localizada a noroeste da sede do município de Caçapava do Sul (RS) (Fig. 1). Situada no Km 16 da estrada do Cerro do Bugio, também distante cerca de 4Km da estrada que liga a vila Cerrito do Ouro ao município de Lavras do Sul.

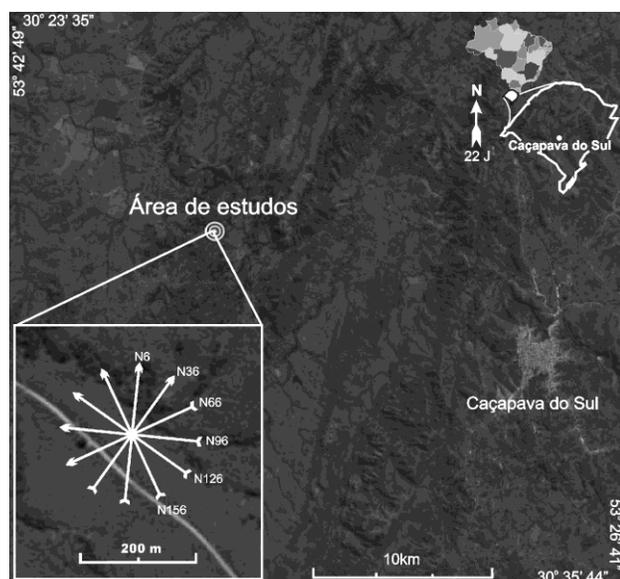


Fig. 1- Localização da área de estudos, com detalhe para a disposição das linhas de aquisição.

A região de estudos está inserida na Bacia do Camaquã, está localizada sobre o Escudo Sul-Rio-Grandense, compreendendo um intervalo temporal de 450-620 Ma (Paim et al., 2000). Esta bacia pode ser definida como a superposição de diferentes bacias individualizáveis tectônica, geocronológica e termodinamicamente (Paim et al., 2000; Chemale Jr., 2000) e sua evolução é relacionada com as fases finais do arrefecimento tectônico da Orogenia Brasileira (Paim et al., 2000).

Esta bacia é caracterizada como de grande aporte sedimentar e subsidência, com espessos pacotes sedimentares e vulcano-sedimentares intercalados por intervalos marcadamente erosionais. Estes pacotes, siliciclásticos, são intercalados por grandes pacotes vulcânicos, principalmente na base das unidades de maior hierarquia. A bacia é fortemente afetada por eventos deformacionais geradores de um padrão de preenchimento complexo (Kazmierczak, 2006).

A ocorrência mineral está alojada em litotipos pertencentes a Formação Passo da Promessa, caracterizada por espessos pacotes de arenitos de cores rosa-claro, cinza e bordo, com alternâncias de cores, dando origem a uma rocha listrada. Apresenta com freqüência níveis conglomeráticos onde os seixos são predominantemente de rochas graníticas e metamórficas, como granitos, gnaisses, quartzitos, xistos, anfíbolitos e ocasionalmente, seixos de rochas sedimentares silicificadas.

No local de estudos ocorre arenito arcoseano médio a grosseiro, de cor marrom-avermelhado, com possíveis fragmentos de riolito, ambos intensamente silicificados e recristalizados. A rocha apresenta as mineralizações de cobre em interstícios de fraturas e zonas de maior porosidade. A mineralização é constituída principalmente de óxidos de cobre, especialmente malaquita e azurita, com calcosina subordinada.

Materiais e Métodos

Foi utilizado o método da Eletrorresistividade, a partir da técnica de caminhamento elétrico para as medidas de resistividade elétrica, por meio do arranjo dipolo-dipolo. Este arranjo consiste na instalação de pares de eletrodos metálicos ao longo da linha de investigação, para transmissão de corrente elétrica e geração de campo elétrico em profundidade (eletrodos de corrente), e posterior leitura por meio de pares de eletrodos de recepção (eletrodos de potencial) (Orellana, 1972).

A razão V/I , ou seja, potencial (V) pela corrente (I) transmitida permite leituras diretas de resistência elétrica em ohms (Ω). A resistência medida é multiplicada pelo fator K , que representa o espaçamento dos eletrodos em superfície e resulta no parâmetro resistividade aparente (eq. 1):

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \Omega.m \quad (\text{eq. 1})$$

A resistividade elétrica de solos e rochas é determinada por diferentes litologias e estruturas geológicas e por isto pode ser muito heterogênea. Dentre todas as propriedades físicas medidas pelos métodos geofísicos, é a que apresenta os maiores contrastes de valores em uma mesma litologia. Este parâmetro é afetado pelo conteúdo de água, porosidade, composição mineralógica, quantidade e natureza dos sais dissolvidos (Lowrie, 2007).

A Polarização Induzida é um fenômeno elétrico provocado pela transmissão de corrente no solo, observado como uma resposta defasada de voltagem nos materiais terrestres (Telford et al., 1990). O efeito IP varia com a resistividade efetiva da rocha hospedeira, isto é, o tipo de eletrólito, temperatura, tamanho dos poros, dentre outros fatores.

O método tem grande aplicação na prospecção mineral devido a capacidade de detectar disseminações de sulfetos metálicos da ordem de 0,5% em volume. Além da prospecção mineral, o método vem sendo aplicado nos últimos anos em levantamentos para obras de engenharia civil, prospecção de águas subterrâneas e em questões ambientais (Telford et al., 1990).

As medições de IP podem ser feitas tanto no domínio do tempo ou no domínio da freqüência. Os primeiros são

conhecidos como medições de pulso transiente, este último como variação de frequência. Em ambos os casos, a tensão é medida como uma função tanto do tempo ou frequência.

A forma mais simples para se medir IP é no domínio do tempo, onde é comparada a tensão residual $V(t)$, existente em um tempo t após a corrente ser cortada, com a tensão constante V_c , durante o intervalo de fluxo de corrente (Eq. 2).

$$M = \frac{1}{V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (\text{Eq. 2})$$

Não é possível medir o potencial no instante do corte devido a transientes causados pela quebra do circuito. Por outro lado, $V(t)$ deve ser medido antes da corrente residual decair para o nível de ruído (Lowrie, 2007).

O parâmetro fator metal, originalmente sugerido por Madden & Cantwell (1967), permite uma correlação entre os parâmetros resistividade elétrica e cargabilidade e , em determinados casos, possibilita uma caracterização efetiva de anomalias polarizáveis (Eq. 3).

$$FM = \frac{1000.M}{R} \quad (\text{Eq. 3})$$

Resultados

O equipamento utilizado foi o resistímetro Syscal Pro, fabricado pela Iris (França), com resolução de $1 \mu\text{V}$. Este equipamento é calibrado para medidas de resistividade e cargabilidade por meio de ciclos periódicos de corrente elétrica alternada e de baixa frequência, procedimento que permite a filtragem de ruídos do sinal adquirido.

A disposição de forma adequada dos pares de eletrodos de corrente e potencial permite leituras de resistividade elétrica para diversos níveis de profundidade na linha investigada. Este trabalho utilizou 10m de espaçamento entre eletrodos, leituras de resistividade em 20 níveis de profundidade.

Foram realizadas 6 linhas de caminamento elétrico, com 230m de extensão cada, dispostas de forma azimutal, ou seja, radialmente com centro posicionado sobre a ocorrência mineral e ângulo entre linhas de 30° (Fig. 1).

Os dados interpretados foram processados no software RES2DINV, apresentados sob a forma de seções distância x profundidade. Os resultados são apresentados sob a forma de modelo de inversão em termos de resistividade elétrica e do parâmetro derivado fator metal.

Os dados estruturais foram processados pelo programa Stereonet, que realiza a interpolação gráfica em diagramas esféricos, os dados são apresentados em projeção planar de hemisfério inferior (Fig. 2).

No estereograma dos dados estruturais é possível a identificação das principais famílias de fraturamento, nas direções $N18^\circ$ e $N112^\circ$, ambas preenchidas por carbonatos e hidróxidos de cobre, além de barita e quartzo (Fig. 2).

As linhas de fator metal nos modelos de inversão apresentados na figura 3 são caracterizadas por uma grande variação nos valores, apresentando desde valores baixos, $5 \text{ mV/V}/\Omega.\text{m}$ até muito altos $500 \text{ mV/V}/\Omega.\text{m}$. As linhas $N156^\circ$, $N126^\circ$ e $N36^\circ$ são

caracterizadas por anomalias de baixo fator metal localizadas no centro da seção na posição 120m representadas por valores entre $7 \text{ mV/V}/\Omega.\text{m}$ e $50 \text{ mV/V}/\Omega.\text{m}$.

A linha $N66^\circ$ apresenta uma anomalia circular próxima a superfície apresentando baixos valores do parâmetro fator metal em torno de $15 \text{ mV/V}/\Omega.\text{m}$, próximo a esta anomalia são observados valores elevados que também apresentam formato circular e estão dispostas próximas a superfície e ocorrem em toda a extensão da linha, abaixo destas anomalias circulares ocorre uma faixa horizontal que apresenta valores intermediários, em torno de $40 \text{ mV/V}/\Omega.\text{m}$ (Fig. 3).

Todas as linhas foram integradas num modelo tridimensional para o parâmetro resistividade elétrica, nos quais são orientadas as linhas que cruzam as principais famílias de fratura. As seções $N6^\circ$ e $N96^\circ$ de resistividade e fator metal são apresentadas em conjunto com o modelo tridimensional. O modelo permite uma noção de formato das áreas com provável ocorrência de mineralização (Fig. 4).

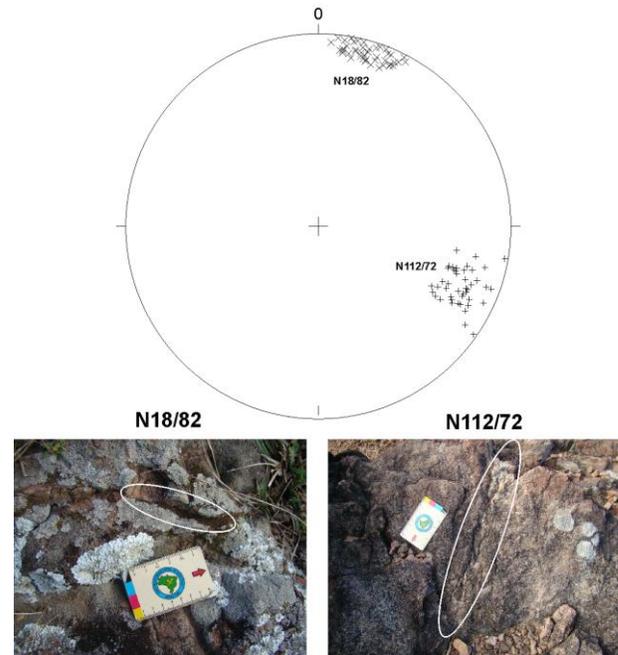


Fig. 2 - Estereograma de fraturas com foto das principais famílias, com projeção em hemisfério inferior.

A área está localizada na Bacia Sedimentar do Camaquã, onde é encontrada a principal mina de Cobre do estado do Rio Grande do Sul denominada Mina de Camaquã, que apresenta diversos estudos relacionados a sua gênese e evolução, assim como estudos geoquímicos.

A gênese do minério de Camaquã é de origem hidrotermal magmática segundo Teixeira (1937), Leinz & Almeida (1941) e Costa Filho (1944), encontrado como filões e preenchendo fraturas que provocam alterações na rocha encaixante, como silicificação, argilização e disseminações. De acordo com as hipóteses vigentes na época destes trabalhos, a ascensão de fluidos hidrotermais originados de corpos magmáticos profundos

por meio de fraturas nas rochas sobrejacentes, teria resultado no depósito de Camaquã.

Este modelo também é defendido no trabalho de Bettencourt (1972), com algumas variações quanto as possíveis fontes magmáticas.

A partir das características apontadas nos trabalhos supracitados, Beckel (1990) sugere que os fluidos hidrotermais formadores dos depósitos de Camaquã é semelhante aos depósitos do tipo Cobre pórfiro.

Conclusões

Os métodos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida e o parâmetro derivado Fator Metal demonstram resultados satisfatórios na detecção de sulfetos disseminados, com identificação de zonas anômalas em profundidade, associadas a ocorrência mineral aflorante.

A linha N6° apresenta uma zona anômala na região central com resistividade intermediária, que pode ser correlacionada a uma zona com presença de hidróxidos e carbonatos de cobre, descritos em afloramento.

Abaixo desta zona são observados valores mais baixos de resistividade, que podem estar associados à presença de sulfetos de cobre. Nesta mesma posição é possível identificar uma zona com intensidade elevada em termos de fator metal, fato este que corrobora a hipótese da presença de sulfetos de cobre. A linha N96° apresenta uma zona anômala em profundidade em termos de resistividade elétrica, que também pode ser correlacionada a presença de sulfetos, em semelhança a seção N6°.

Esta zona está localizada sob a área de afloramento superficial dos carbonatos e hidróxidos e apresenta continuidade lateral, também observada no modelo de inversão de fator metal, que apresenta uma zona anômala de alta intensidade coincidente com a zona de baixa resistividade.

Zonas com elevada resistividade são observadas tanto próximas a superfície quanto em profundidade e podem estar relacionadas a rocha encaixante, representada na área por arenito arcoseano, ou a intervalos silicificados. O cimento silicático que preenche os poros do arenito apresenta comportamento de um condutor dielétrico, ou seja, dificuldade ao trânsito de corrente elétrica.

O modelo 3D apresenta uma zona de baixa resistividade próxima da superfície, possivelmente associada à presença de hidróxidos e carbonatos, enquanto que em profundidade há uma zona com resistividade ainda mais baixa, possivelmente relacionada à presença sulfetos disseminados.

Os modelos tridimensionais apresentam uma perspectiva espacial que possibilita a compreensão mais clara do formato do depósito mineral. As descrições e interpretações obtidas a partir das seções individuais de resistividade são válidas para este modelo.

Os dados obtidos neste estudo não permitiram o estabelecimento da profundidade máxima de ocorrência de sulfetos, pois aparentemente há continuidade abaixo de 50m. Desta forma, é recomendado à realização de estudos em maiores profundidades, além da aplicação de outros métodos de investigação.

Referências

BECKEL, J. Metalogenia del Cu, Pb y Zn em la Cuenca de Camaquã durante el ciclo orogênico Brasileiro, RS (Brasil). 1990. 275 p. Tese (Doutorado) - Universidade de Salamanca. Espanha.

BETTENCOURT, J.S. A mina de cobre de Camaquã, Rio Grande do Sul. 1972. 175 p. Tese (Doutoramento) - Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CHEMALE Jr.,F. Evolução geológica do Escudo Sul-riograndense. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Org.). Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 13 - 52.

COSTA FILHO, J.H. Prospecção das minas de cobre de Camaquã, Rio Grande do Sul. DNPM. Ministério da Agricultura. Boletim. nº 59. 1944. p. 13-94.

IRVINE, R.J.; SMITH, M.J. Geophysical exploration for epithermal gold deposits. Journal of Geochemical Exploration. vol. 36. p 375 - 412. 1990.

KAZMIERCZAK, T.S. Mapeamento da Bacia do Camaquã com a Utilização de dados geofísicos, geologia e sensoriamento remoto. 2006. 110 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LEINZ, V.; ALMEIDA, S.C. Gênese da jazida de cobre "Camaquam", município de Caçapava – Rio Grande do Sul. Secretaria dos Negócios de Agricultura Indústria e Comércio do Estado do Rio Grande do Sul, DPM, Boletim nº 88, 56 p. 1941.

LOWRIE, W. Fundamentals of Geophysics. 2ª. Ed. Cambridge University Press. 381p, 2007.

MADDEN, T.R, CANTWELL, T.. Induced polarization, a review, in Mining geophysics, vol 2 theory, cap. 2, part. d, 401 - 419. 1967.

ORELLANA, E. Prospeccion geoeletrica en corriente continua. Biblioteca Técnica Philips. Madrid: Paraninfo, 523 p. 1972.

PAIM, P.; CHEMALE Jr.,F.; LOPES, R.C. A Bacia do Camaquã. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Org.). Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 231-274.

TEIXEIRA, E. Cobre no Rio Grande do Sul. Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral, DNPM. Rio de Janeiro. Avulso 22. 29p. 1937.

TELFORD, W.M; GELDART, L.P; SHERIFF, R.E. Applied Geophysics. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 770p. 1990.

WHITE, R.; COLLINS, S.; DENNE, R.; HEE, R.; BROWN, P. A new survey design for 3D IP inversion modelling at Copper Hill. Exploration Geophysics. Vol. 32. p. 152-155. 2001.

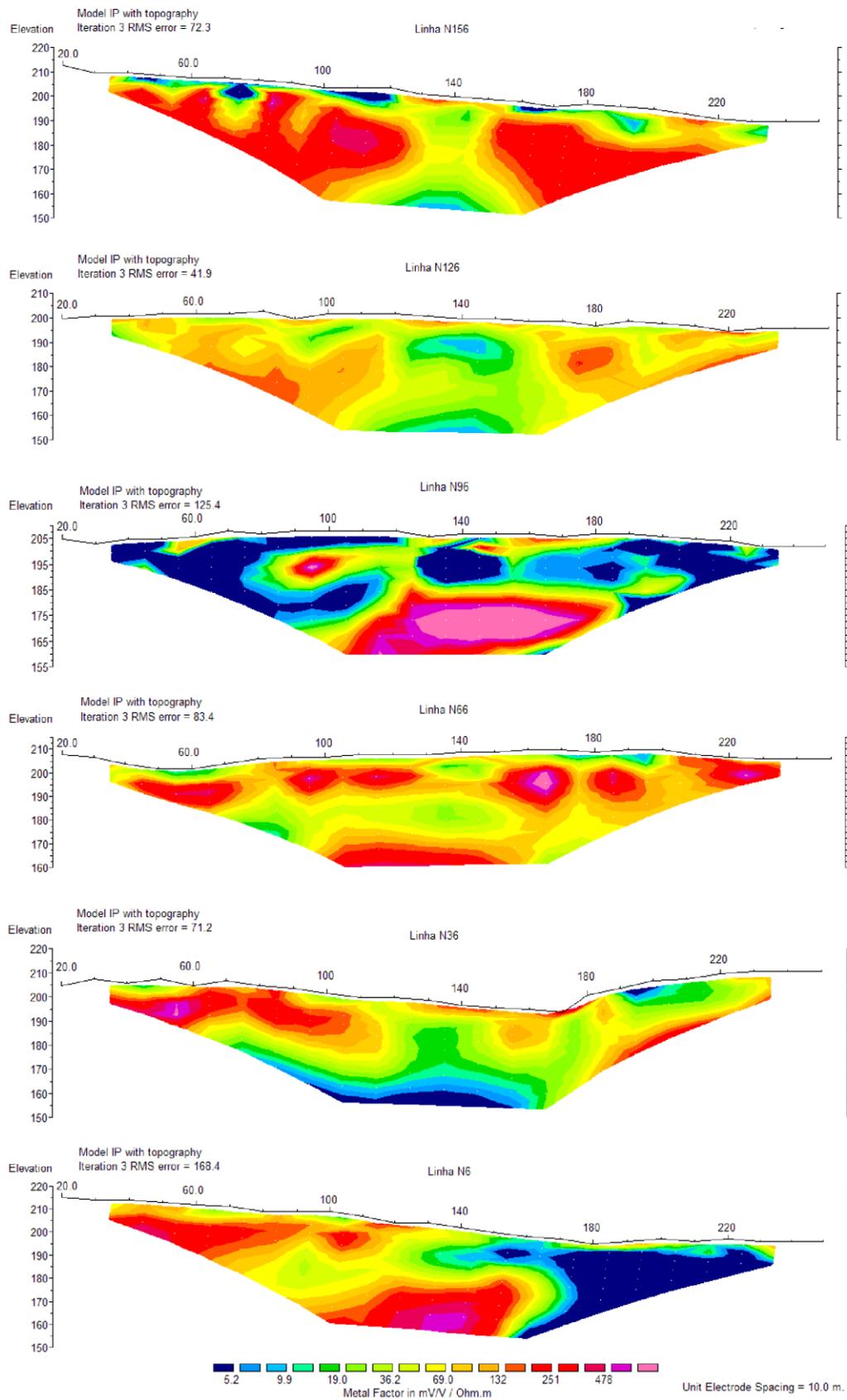


Fig. 3 – Modelo de inversão em termos de fator metal.

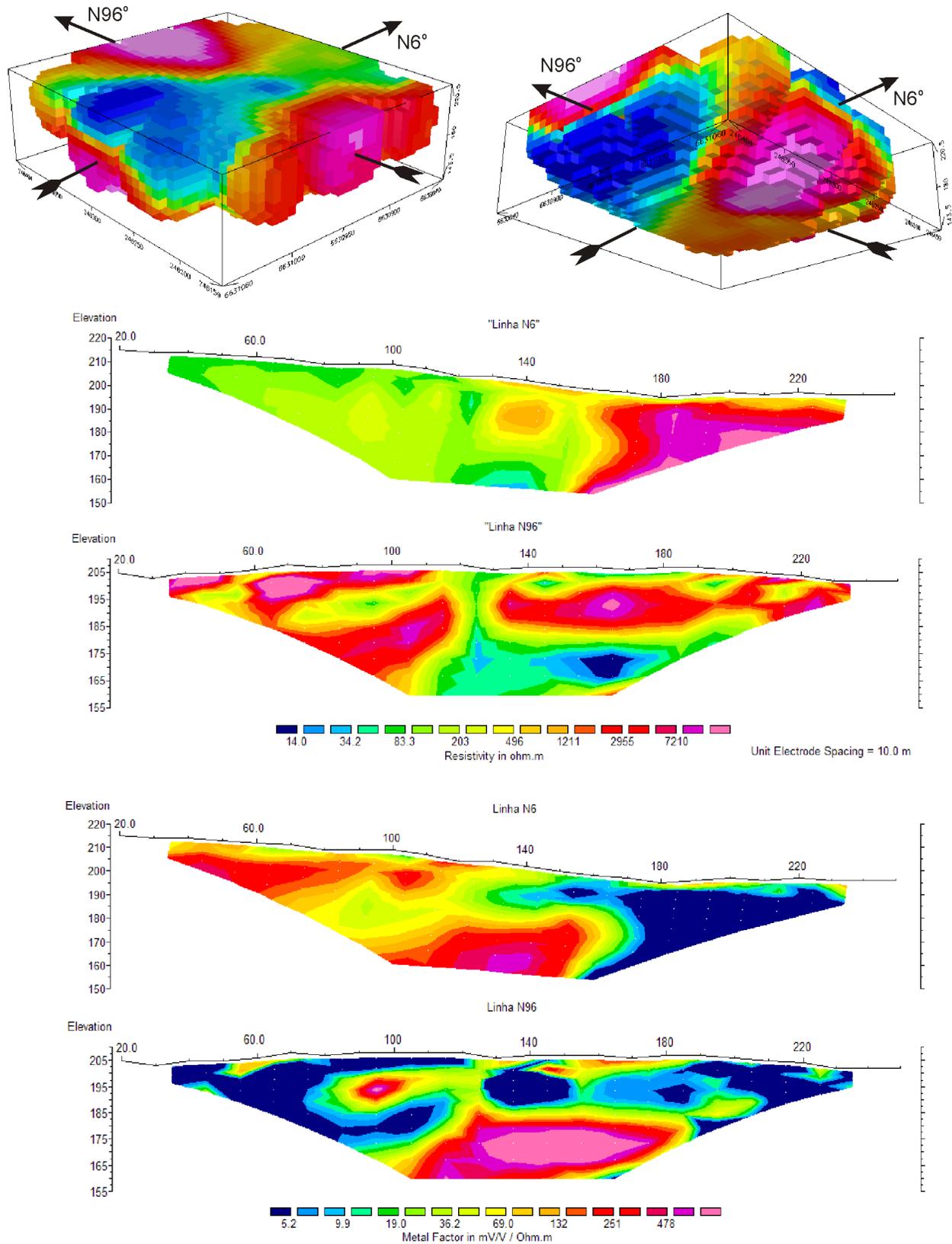


Fig. 4 - Modelo 3D de resistividade e modelos de inversão em termos de resistividade e fator metal perpendiculares as principais famílias de fratura.