



## Avaliação da resposta do método de polarização induzida sobre mineralizações sulfetadas do Depósito Polimetálico Santa Maria, Minas do Camaquã – RS

João Henrique Boniatti\*, Allan Fruchting\*, Samuel Bouças do Lago\*, Francisco Tomazoni Neto\*, Rodrigo Piraine Travassos\*, Rafael Fernandes de Freitas\*.

\* Votorantim Metais

Copyright 2014, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI 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.

### Abstract

*The Santa Maria polymetallic deposit is located in central portion of the Rio Grande do Sul State, Brazil, and was discovered in 1970's by Companhia Brasileira do Cobre (CBC). Nowadays, the project is a joint venture between Votorantim Metais and CBC/IamGold.*

*The host rocks are clastic sediments of the Santa Barbara Group, related to progradational molassic sequences developed during Neoproterozoic. The mineralization is fractured-controlled constituted by lead-zinc disseminated and massive sulfide, interpreted with distal magmatic-hydrothermal in origin.*

*This paper presents the results of the induced polarization survey carried out on known mineralized bodies, using dipole-dipole and IP imaging arrays. The inversion models of apparent chargeability data shows polarized anomalies that are coincident with lead-zinc soil geochemistry anomalies and metallic content in drillholes. The resistivity allows defining the lithological contact between the sandstone and conglomerate.*

### Introdução

A necessidade cada vez maior de otimizar recursos financeiros na exploração de metais base tem alavancado o uso de métodos geofísicos como ferramentas capazes de definir alvos e orientar as campanhas de sondagem.

Durante mais de 25 anos de pesquisa executada pela Companhia Brasileira do Cobre (CBC) sobre o Depósito de Pb-Zn-Ag de Santa Maria, Minas do Camaquã-RS, foram testados os mais variados métodos geofísicos para avaliação da assinatura da mineralização sulfetada. Dentre estes métodos pode-se citar a magnetometria, eletromagnetometria, eletroresistividade, gravimetria e sísmica, adquiridos através das mais variadas técnicas e arranjos.

Dois trabalhos realizados por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (1984) e Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais - CPRM (1993) testaram parte dos métodos supracitados, com conclusões

interessantes à respeito da polarização induzida (*Induced Polarization – IP*).

Baseado nestes resultados procedeu-se o reprocessamento e inversão dos dados da CPRM, concomitantemente à aquisição de dois novos perfis utilizando a técnica de imageamento por IP, com o objetivo de rastrear e delinear em profundidade anomalias de cargabilidade e/ou resistividade associadas às mineralizações sulfetadas do tipo *stringer* e *stratabound*.

O presente trabalho discute os resultados da integração e interpretação das seções de cargabilidade e resistividade verdadeira, juntamente com geoquímica de solo, sondagens diamantadas, magnetometria e eletromagnetometria. As anomalias de cargabilidade observadas estão balizadas por sondagens, onde foram constatados intervalos sulfetados disseminados e/ou maciços, constituídos por galena, esfalerita e calcopirita/calcosita.

### Geologia e Mineralização

O depósito polimetálico (Pb-Zn-Ag) de Santa Maria está localizado no Município de Caçapava do Sul – RS, cerca de 120 Km da fronteira com o Uruguai. Encontra-se inserido dentro do Escudo Sul-Riograndense, onde predominam unidades litoestratigráficas neoproterozóicas (rochas vulcânicas e sedimentares) pertencentes ao Supergrupo Camaquã, separadas por discordâncias regionais e tectônicas em ambiente tardi a pós-tectônico (Fragoso-Cesar *et al.* 2003).

De acordo com o trabalho de Fambrini *et al.* (2006), o Supergrupo Camaquã remonta uma paleogeografia relacionada a sequências molássicas progradacionais, com início de deposição marinho profundo (leques submarinos e turbiditos associados), passando para marinho raso e costeiro (ritmitos, arenitos finos, laminados com marcas de ondas e leques costeiros), culminando com continental (fluviais, aluviais, lacustres e eólicos).

A mineralização se concentra em rochas da Formação Seival, Grupo Santa Bárbara, principalmente em arenitos médios a finos do tipo *red beds* com intraclastos pelíticos, laminação plano-paralela e cruzada, mergulho entre 20° e 35°, sobrepostos por conglomerados da Formação Rincão dos Mouras (Fambrini *et al.* 2005), polimíticos, com matriz arenosa e seixos centimétricos a decamétricos. O Grupo Santa Bárbara encontra-se em

algumas porções do depósito encoberto por arenitos conglomeráticos fluviais do Grupo Guaritas.

O depósito apresenta-se disposto em três corpos minerais denominados de Área 1 (sub-econômico) e Áreas 2 e 3 (em avaliação), sendo que o corpo 3 é o principal e apresenta 1,3Km de *strike* N-S (figura 1).

A mineralização está controlada por um sistema de fraturas e brechas diretamente associadas a alterações sericíticas, sendo o grupo das ilitas os portadores dos sulfetos de Pb e Zn (galena e esfalerita respectivamente). Além da mineralização preponderante de galena e esfalerita distribuída em forma de *stringers* de alto teor e halos disseminados de mais baixo teor (*stratabound*), identificam-se porções com halos de alteração à clorita, os quais tendem a carregar sulfetos de Cu (calcocita, bornita e calcopirita) quando associadas a estruturas rúpteis (figura 2). Interessante destacar que associado aos halos de alteração de ilita-clorita, ocorre piritização fina. Eventualmente, carbonato de cobre (malaquita) é observado nos planos de acamamento e/ou fraturamento, porém quando em ambiente oxidante, as sulfetações podem estar oxidadas e hematitizadas.

Diversos são os trabalhos que procuram elucidar a gênese dos metais na província Camaquã, não havendo ainda consenso geral entre os diferentes autores. Os principais modelos aventados podem ser agrupados em três correntes: a) mineralização hidrotermal-magmática, associado à intrusões graníticas tipo Caçapava do Sul; b) mineralização singenética e c) mineralização diagenética.

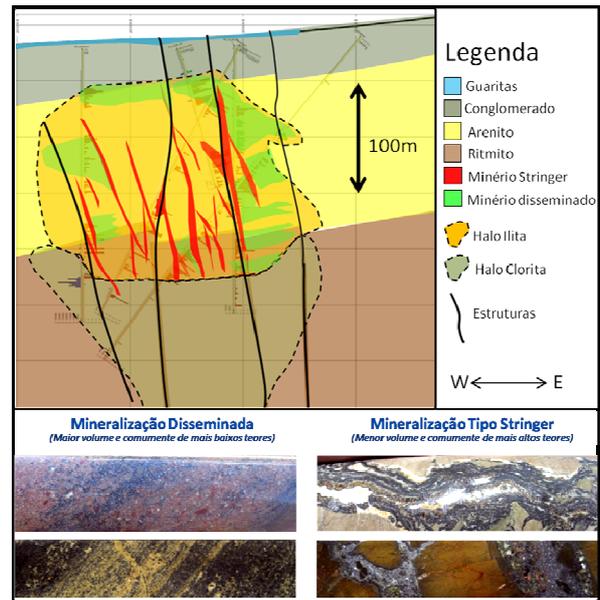


Figura 2: seção geológica exemplificando os dois padrões texturais de minério (disseminado e stringer) associados aos halos de alteração hidrotermal de ilita-clorita.

**Materiais e Métodos**

O fenômeno da polarização induzida (IP) foi descrito inicialmente por volta de 1920 por Conrad Schlumberger durante ensaios geolétricos realizados próximo de jazimentos de sulfetos (Dobrin 1960, Orellana 1974). De acordo com as observações de Schlumberger, a diferença de potencial medida entre os eletrodos de potencial, não decaía instantaneamente a zero quando a corrente era desligada (*shut-off*), mas sim de maneira lenta e contínua por vários segundos.

O método IP fornece informações sobre a resistividade aparente de um determinado volume de rocha ou solo, enquanto a cargabilidade (parâmetro relacionado ao fenômeno IP) determina a capacidade do meio em acumular energia eletroquímica. Os dados de polarização induzida podem ser medidos tanto no domínio do tempo quanto da frequência, cada qual com vantagens específicas (Telford 1990).

As principais aplicações envolvem a caracterização de propriedades hidráulicas e/ou do substrato rochoso, monitoramento de processos biogeoquímicos em subsuperfície, mapeamento de descontinuidades geolétricas (falhas e fraturas), detecção de plumas de contaminação por hidrocarbonetos ou aterros sanitários e determinação de corpos polarizáveis associados à sulfetos disseminados e/ou rochas grafitosas.

Os primeiros dados de IP que puderam ser avaliados foram adquiridos pela CPRM (1993) utilizando um conjunto *McPhar*, modelo P660 que mede o efeito IP no domínio da frequência. Foram levantados cinco perfis com direção leste-oeste totalizando 5200 metros, sendo

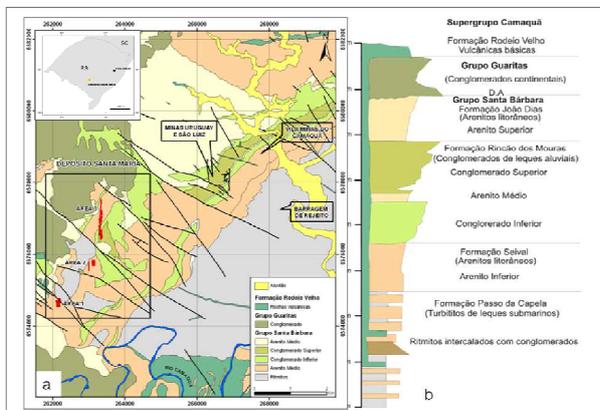


Figura 1: a) mapa geológico simplificado e b) coluna estratigráfica, para a região do Depósito Santa Maria (modificado de CBC, 1993).

quatro com o arranjo dipolo-dipolo, espaçamento de 50 metros entre eletrodos AB-MN e 7 níveis de investigação, e um perfil com arranjo gradiente, dois espaçamentos entre eletrodos AB: 1200 e 1800 m, e distâncias entre os MN de 50 metros. As frequências selecionadas para medir o PFE (*percentage of the frequency effect*) foram 0.3 Hz e 2.5 Hz respectivamente.

Uma vez que o relatório não dispunha de seções verdadeiras, estes dados foram digitalizados, editados (remoção leituras espúrias) e invertidos através do *software* TS2DIP da Zonge<sup>TM</sup>. Paralelamente ao trabalho de reprocessamento, foi executado outro levantamento utilizando a técnica de Imageamento Elétrico 2D (ImIP) (AFC Geofísica 2009), a qual permite maior quantidade de leituras e profundidade de investigação em comparação ao levantamento tradicional. Para tal orientativo foram utilizados um receptor ELREC PRO e um transmissor VIP 4000 ambos da *Iris Instruments* que adquirem dados no domínio do tempo.

Foram perfiladas duas seções com 1.000 m cada (seções 76700 e 77300) sobre a mineralização conhecida, primeiramente com um arranjo dipolo-dipolo, separação entre eletrodos AB-MN de 50 metros, 8 níveis e profundidade máxima de investigação de 100 metros. O segundo teste utilizou a técnica ImIP com espaçamento de 50 metros e significativo ganho de profundidade de investigação: 200 metros.

**Resultados Obtidos**

As seções 2D de resistividade (Ohm\*m) e cargabilidade (mV/V) obtidas através da técnica ImIP foram integradas com os furos de sondagem diamantada, com os resultados de geoquímica de solo para os elementos Pb, Zn e Cu, e com os perfis calculados a partir das malhas de interpolação (*grids*) de magnetometria e eletromagnetometria (VTEM), usando o módulo *Target* do *software* *Oasis Montaj, Geosoft*<sup>TM</sup>.

O objetivo destas seções é propiciar uma interpretação mais coerente dos resultados, uma vez que informações multifontes (geofísica, geoquímica e geologia) podem ser acessadas paralelamente e na mesma escala horizontal.

**Seção 76700**

Os resultados da seção de cargabilidade confirmaram a presença de duas anomalias (figura 3), sendo a primeira, mais à oeste (CHG 1), apresenta profundidade do topo próximo à 70 metros e valores máximos de cargabilidade de 6 mV/V, que poderiam estar refletindo uma fraca disseminação. A imagem da seção de resistividade verdadeira (figura 4) mostra uma descontinuidade geoeletrica posicionada exatamente sobre a anomalia de cargabilidade.

A segunda e mais importante anomalia de cargabilidade (CHG 2) está relacionada à mineralização conhecida do Depósito Santa Maria, com valores de cargabilidade de até 16 mV/V, resposta típica para mineralizações

sulfetadas disseminadas. A profundidade do topo da fonte está a 35 metros. Esta anomalia de IP é coincidente com interceptos de até 18% de Zn em furos de sondagem, com piritização associada. Pequenas anomalias circulares e superficiais de cargabilidade podem ser interpretadas como decorrente do efeito de polarização de membrana e associadas à pequenas lentes de pelitos (argila) dentro do conglomerado e arenito. Os valores de resistividade para o conglomerado variam entre 100 e 1.500 Ohm\*m e para o arenito entre 50 a 2.000 Ohm\*m.

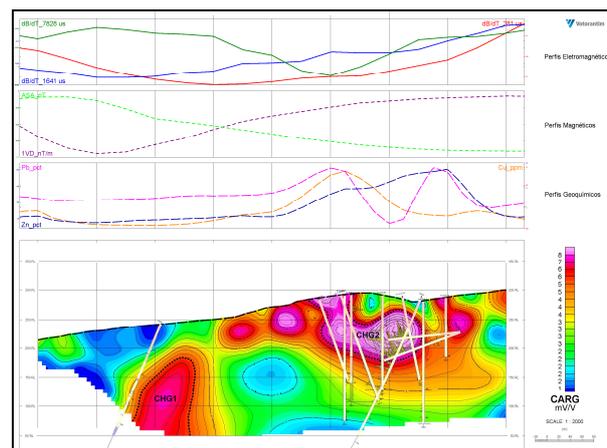


Figura 3: seção de cargabilidade verdadeira da L76700, com indicação das principais anomalias de IP.

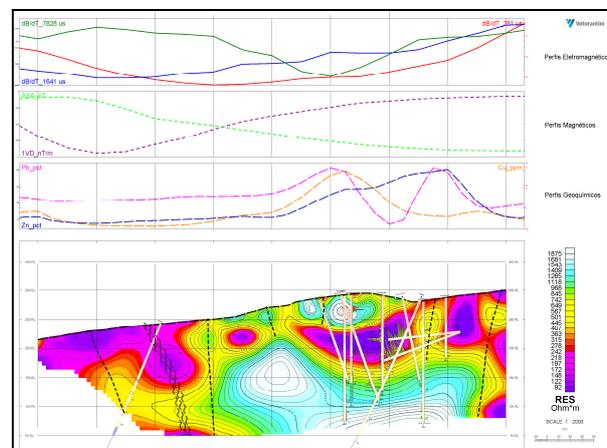


Figura 4: seção de resistividade verdadeira da L76700, sugerindo várias descontinuidades geoeletricas verticalizadas.

Medidas de susceptibilidade magnética e condutividade elétrica obtidas com o aparelho MPP-EM2S da *GDD Instruments*, indica baixo contraste magnético entre a mineralização e rochas hospedeiras, com envelope inferior a  $2 \times 10^{-3}$  SI (figura 5). As maiores amplitudes de susceptibilidade magnética ( $4$  a  $6 \times 10^{-3}$  SI) são encontradas na base do furo associadas à hematita disseminada. Já a condutividade elétrica mostra boa correlação com a mineralização do tipo maciço (> 40% de sulfetos), atingindo valores próximos a 1 Hz (*Hertz*).

Leituras similares no início do furo podem indicar associação com lentes ricas em argila dentro do pacote de arenitos.

Os perfis geoquímicos de solo para os elementos Pb, Zn e Cu são perfeitamente correlacionáveis, contudo o Pb e Cu define melhor a posição da mineralização. Perfis da magnetometria aérea (VTEM) não evidenciam nenhuma anomalia associada à mineralização, mesmo quando são utilizados filtros de realce (amplitude do sinal analítico e primeira derivada vertical), conforme comprovado pelos dados de susceptibilidade magnética. Já o perfil eletromagnético (VTEM) da janela de tempo equivalente a 7828  $\mu s$  (pV/A/m4) mostra uma anomalia resistiva condizente com a seção de resistividade verdadeira, possivelmente associada aos arenitos cimentados por minerais da paragénese hidrotermal.

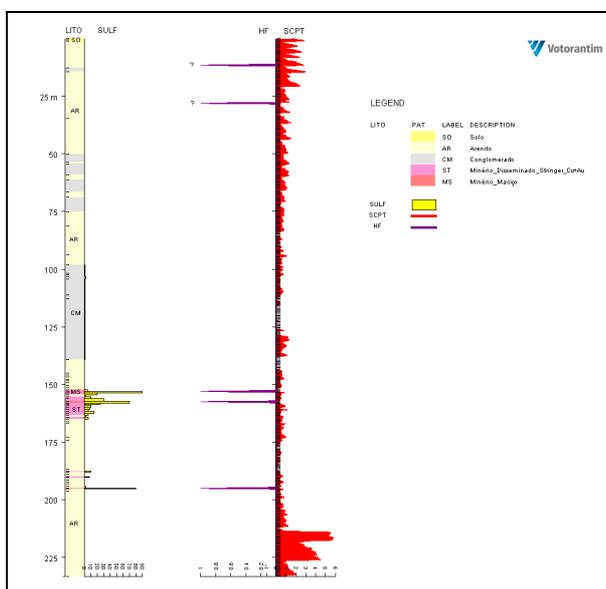


Figura 5: log de susceptibilidade magnética – SCPT ( $\times 10^{-3}$  SI) e condutividade elétrica - HF (Hertz) para o furo diamantado FSM0019. Notar o pequeno envelope de susceptibilidade magnética para a mineralização e rochas hospedeiras e a resposta condutiva do minério maciço (> 40% de sulfeto).

Seção 77300

Esta seção apresenta também duas anomalias de cargabilidade (figura 6). A primeira anomalia (CHG 1) tem valores de IP entre 11 e 16 mV/V e profundidade do topo da fonte anômala em 170 metros. A anomalia é correlacionável à fraca disseminação de calcopirita e calcosita com presença de hematita em fraturas.

A segunda anomalia de IP (CHG 2) tem valores próximos a 12 mV/V, profundidade do topo variando de 40 a 60 metros e coincidente com a mineralização, onde os teores de Zn chegam a 9%. A mineralização encontra-se associada aos arenitos, sobrepostos por conglomerados. Há furos com baixos teores de Zn e altos de Pb

associados às anomalias de cargabilidade. Isso pode estar relacionado à baixa polarização da esfalerita em comparação com a galena. Telford et al. (1990) quantificaram em laboratório o tempo de descarga (milissegundos) para vários minerais, com concentração de 1% destes nas amostras: pirita (13.4); calcosita (13.2); cobre (12.3); grafita (11.2), calcopirita (9.4); bornita (6.3); galena (3.7); magnetita (2.2); malaquita (0.2); hematita (0.0). Infelizmente não foram encontrados valores de referência para esfalerita.

A seção de resistividade verdadeira (figura 7) sugere um contato geolétrico subhorizontal coincidente com a passagem do conglomerado (< 200 Ohm\*m) para o arenito (resposta de 400 a > 1000 Ohm\*m), bem como uma descontinuidade vertical associada à anomalia CHG 1, refletindo uma possível zona de fratura e/ou falha. Outra estrutura que chama atenção é um alto condutivo no extremo leste da seção, coincidente com os perfis eletromagnéticos.

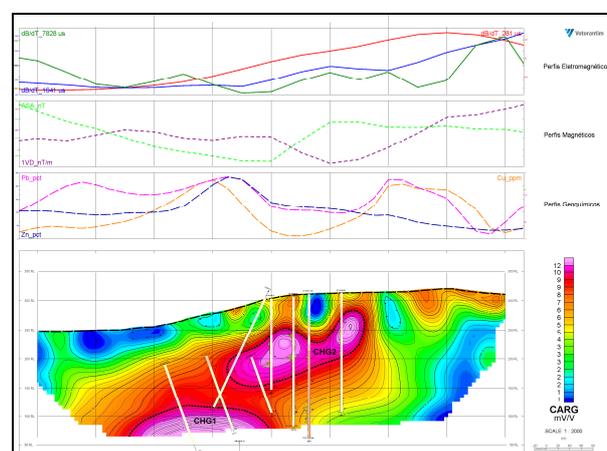


Figura 6: seção de cargabilidade verdadeira da L77300, com indicação das principais anomalias de IP.

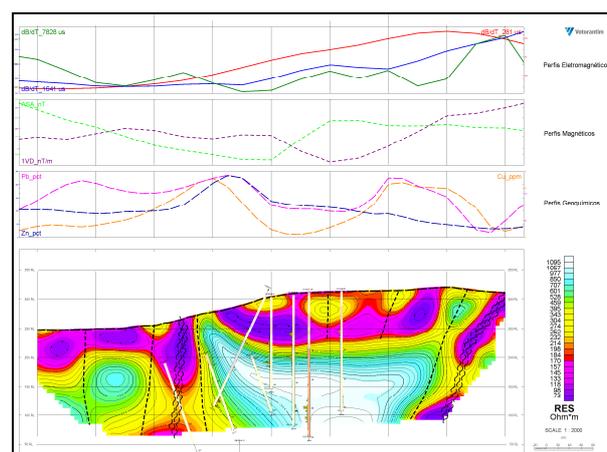


Figura 7: seção de resistividade verdadeira da L77300, sugerindo várias descontinuidades geolétricas subverticalizadas.

A geoquímica de Pb apresenta boa correlação, com apenas um pico anômalo de Zn à juzante da mineralização. Os perfis da amplitude do sinal analítico (ASA) e da primeira derivada vertical (1VD) mostram uma sutil anomalia sobre os intervalos sulfetados, decorrente do preenchimento de fraturas por hematita. Os perfis eletromagnéticos equivalentes às janelas 1641 e 7828  $\mu$ s (*late time channel*) indicam um aumento da resistividade coincidente com a seção do levantamento terrestre. Como observado em furos de sondagem, esse aumento da resistividade nos arenitos parece estar associado à cimentação de quartzo e carbonato, bem como halos de alteração de illita-clorita nas encaixantes da mineralização. A anomalia condutiva presente no extremo leste da seção L7730 é coincidente com os perfis eletromagnéticos e pode estar relacionada a uma zona de fratura e/ou falha.

**Integração 2D**

Os dados de cargabilidade dos 7 níveis do arranjo dipolo-dipolo da CPRM (1993) foram interpolados separadamente para análise em planta. A imagem da profundidade equivalente a 80 metros foi integrada às sondagens e corpo de minério projetado (figura 8).

As seções C e D ao sul definem um *trend* de cargabilidade com direção NNE, associado à mineralização conhecida. Nas seções A e B à norte, observam-se anomalias de cargabilidade de primeira e segunda prioridades, associadas a descontinuidades geoeletricas sobre a Falha das Três Figueiras. Considerando a movimentação lateral direita desta falha, é possível que estas anomalias estejam relacionadas à remobilização de sulfetos e não ao deslocamento do corpo de minério principal.

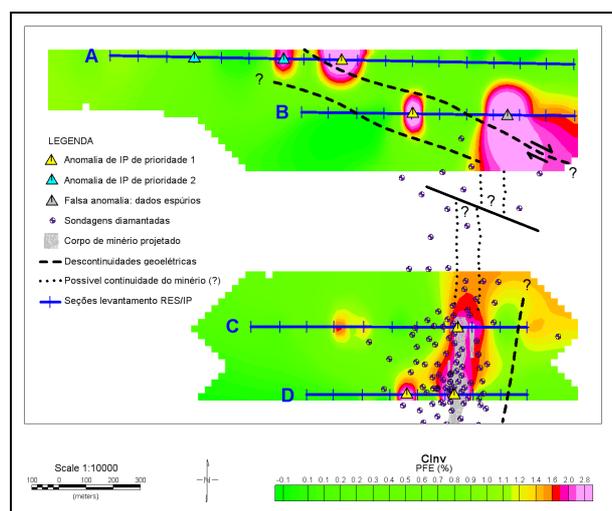


Figura 8: mapa de interpretação de cargabilidade para a profundidade de 80 metros, mostrando possível deslocamento da anomalia relacionada ao corpo conhecido.

Durante o reprocessamento foram reconhecidos dados incoerentes (espúrios) no extremo leste da seção B que sugerem a presença de uma anomalia de cargabilidade em profundidade. Perfis geoeletricos complementares, entre as seções B e C e ao norte da A, serão adquiridos para confirmar a continuidade da mineralização.

**Integração 3D**

As seções invertidas de cargabilidade dos dois levantamentos foram empilhadas para visualização em 3D juntamente com as sondagens, teor de Zn (%) nos furos e corpo de minério modelado (figura 9).

As anomalias de cargabilidade se repetem ao longo de todas as seções, com algumas variações laterais, comprovando o caráter polarizável da mineralização. A projeção da anomalia de cargabilidade relacionada ao minério sobre a seção B não exibe boa correlação. Especula-se que falhas com direção NW e movimentação lateral-direita, possam ter deslocado o corpo para leste-sudeste.

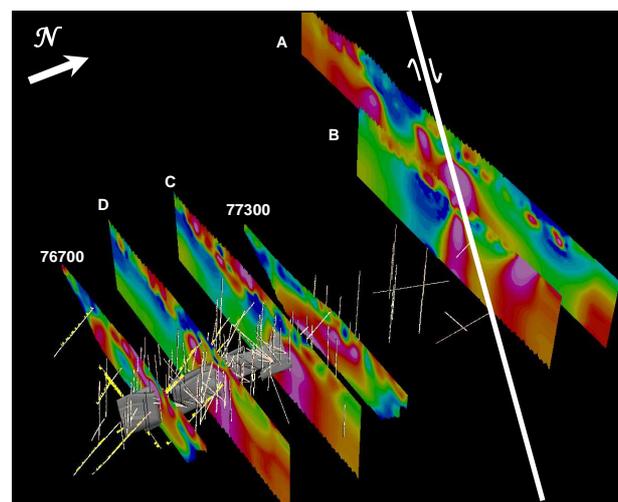


Figura 9: seções empilhadas de cargabilidade (mV/V e PFE %) integradas às sondagens e corpo de minério modelado (sólido cinza).

**Conclusões**

Os levantamentos de resistividade e polarização induzida conduzidos sobre o Depósito Santa Maria confirmaram o caráter polarizável da mineralização de Pb-Zn-Ag conhecida, bem como suas dimensões laterais e profundidade.

O reprocessamento e inversão de dados antigos possibilitaram a integração conjunta de outros métodos geofísicos (magnetometria e eletromagnetometria) e geoquímicos (amostragem de solo) em ambiente georreferenciado, ao invés das antigas malhas locais.

A utilização da técnica de Imageamento Elétrico 2D validou os dados reprocessados, além de trazer novas

perspectivas para intersecções sulfetadas a profundidades abaixo de 150 metros.

Ao utilizar mapas de diferentes níveis de profundidade pôde-se constatar a presença de um *trend* de cargabilidade com direção NNE, associada ao corpo já sondado. Portanto o uso do método de IP/RES poderá ser utilizado em novas áreas, uma vez que a cargabilidade mostrou ser um ótimo parâmetro físico para discriminar este tipo de mineralização disseminada, em razão da presença de bons minerais polarizáveis (pirita, calcopirita, calcosita e bornita) associados à galena e esfalerita.

Considerando o *strike* do minério e deslocamento dextral da Falha das Três Figueiras é possível que parte do corpo sulfetado tenha sido transportado para leste-sudeste. Caso esta interpretação seja corroborada por novos levantamentos geofísicos e sondagens, abre-se um novo panorama de pesquisas para o Depósito de Santa Maria.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Votorantim Metais, Companhia Brasileira do Cobre (CBC) e IamGold pela liberação dos dados e aos geólogos do projeto pelas contribuições sobre aspectos da geologia local e mineralização.

#### Referências

AFC Geofísica. 2009. Relatório sobre teste com Imageamento por IP realizado na área do Alvo Santa Maria, Minas do Camaquã – RS. Trabalho executado para a Votorantim Metais – VM. Relatório Interno, 7p.

Companhia Brasileira do Cobre – CBC. 1993. Relatório de Mapeamento Geológico na Região das Minas de Camaquã. Relatório Interno, 22p.

Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais – CPRM. 1993. Teste geofísico pelo método de polarização induzida – domínio da frequência. Área da Jazida de Santa Maria, Caçapava do Sul, RS. Trabalho executado para a Companhia Brasileira do Cobre – CBC. Relatório Interno.

Dobrin, M. B. 1960. Introduction to Geophysical Prospecting. 2nd ed., McGraw-Hill, New York, USA, 446p.

Fambrini, G. L.; Janikian, L.; Almeida, R. P.; Fragoso-Cesar, A. R. S. 2005. O Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-Bacia Camaquã Central, RS: estratigrafia e sistemas deposicionais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 2, p. 227-238

Fambrini, G. L.; Almeida, R. P.; Fragoso-Cesar, A. R. S. 2006. Evolução estratigráfica do Grupo Santa Bárbara (Neoproterozóico III) na Sub-Bacia Camaquã Ocidental, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, n. 3, p. 550-565.

Fragoso-Cesar A. R. S., Almeida R. P., Fambrini G. L., Pelosi A. P. M. R., Janikian L. 2003. A Bacia Camaquã: um sistema intracontinental anorogênico de rifts do Neoproterozóico III-Eopaleozóico no Rio Grande do Sul. In: SBG, Encontro Estrat. Rio Grande do Sul – Escudos e Bacias, 1, Anais, p. 139-144.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A. – IPT. 1984. Relatório 19.907 – Relatório IPT sobre caracterização de zonas de enriquecimento Área 03. Trabalho executado para a Companhia Brasileira do Cobre – CBC. Relatório Interno.

Orellana, E. 1974. Prospeccion Geoelectrica por Campos Variables. Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, Madri, 571p.

Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E. Induced Polarization. In: *Applied Geophysics*. 2 Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990, Cap. 9, p. 578 - 610.