



## Processamento e interpretação de dados eletromagnéticos aéreos do sistema VTEM no Brasil.

Eduardo Henrique  
Reconsult Geofísica

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11<sup>th</sup> 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

*Since 2005, there have been several VTEM surveys in the Brazilian territory. There is no doubt of the success and popularity of this system in Brazil. However, frequently, VTEM contractors still do not understand the basic concepts of processing and interpretation of such data. This paper reviews the important aspects of the processing and interpretation of VTEM from a perspective of a geophysicist that has been intensely working with Brazilian VTEM datasets as an interpreter and as a data processing manager.*

### Introdução

Desde o ano de 2005 a GEOTECH tem disponibilizado no Brasil pelo menos um de seus sistemas eletromagnéticos do domínio do tempo em plataforma aerotransportada, chamado comercialmente de VTEM. Este sistema é operado na América do Sul integralmente pela MICROSURVEY Aerolevantamentos e Sistemas com o apoio técnico da RECONSULT Geofísica.

Devido a algumas características singulares deste sistema, como alta resolução espacial, grande momento de dipolo e concetricidade entre o transmissor e o receptor, o sistema VTEM popularizou-se rapidamente tanto no exterior como no Brasil, principalmente com o sucesso na pesquisa de sulfetos maciços.

Exemplos de sucessos exploracionais com VTEM são bem comuns na literatura especializada internacional. Contudo, é raro encontrar artigos que explicam, mesmo que superficialmente, como os dados VTEM são efetivamente processados e quais as premissas geológicas necessárias para garantir o sucesso do capital investido neste tipo de levantamento.

Os usuários e contratadores de levantamentos VTEM têm que ter um entendimento, mesmo que superficial, dos conceitos básicos envolvidos na aquisição e no processamento. Devem também saber quais as técnicas de interpretação mais indicadas na hora de se analisar os dados gerados ou de contratar um intérprete.

Este trabalho discute algumas premissas básicas de VTEM, relatando um pouco a experiência adquirida pelos

geofísicos da RECONSULT durante os diversos projetos conduzidos no território brasileiro.

### Histórico do sistema VTEM

Os primeiros trabalhos com um sistema que originou o VTEM atual foram iniciados 1998 pela GEOTECH, empresa canadense com de 25 anos de experiência em desenvolvimento de sistemas geofísicos aerotransportados. Segundo Witherly *et al.* (2005) o primeiro levantamento comercial de VTEM é datado em dezembro de 2002.

Desde 2002 o VTEM tem passado por diversas melhorias visando reduzir os níveis de ruídos e conseqüentemente prover uma melhor resolução espacial. A potência do transmissor foi significativamente incrementada. O momento também aumento ao ampliar o diâmetro do transmissor de 18 metros para os 26 metros atuais. Ao drenar melhor a energia elétrica gerada pelo helicóptero, a corrente do loop transmissor também foi consideravelmente aumentada no passar dos anos.

Com estas mudanças, entre 2003 e 2005, a razão sinal/ruído do VTEM aumentou dez vezes e o momento de dipolo praticamente dobrou. O que também aumentou a resolução espacial ao reduzir a potência dos filtros aplicados no processamento. Estes melhoramentos permitem que o sistema detecte depósitos moderadamente condutivos como o depósito de zinco de Caber, na província de Quebec no Canadá. Combrick e Lo (2008) mostram dois vãos de VTEM sobre este depósito, um em 2003 e outro em 2005. Em 2003 o sistema praticamente não detectou o depósito que está localizado a cerca de 130 metros de profundidade. Já em 2005, após o aumento da razão sinal/ruído, o VTEM detectou claramente o depósito de Caber.

No ano de 2006 o sistema VTEM foi reconfigurado para prover a resposta calculada do campo magnético (BField) além das medidas da taxa de decaimento do campo eletromagnético (dB/dT) presentes nas versões anteriores, permitindo assim detectar também super condutores que eram invisíveis no dB/dT por decaírem muito lentamente. Combrick e Lo (2008) mostram também um interessante teste sobre o depósito de Fox River também no Canadá que tem uma condutância de 7.000 S pela presença de 45% de pirrotita. Devido a alta condutância do corpo, os dados dB/dT praticamente não detectam o corpo, já os dados de BField mostram uma anomalia forte sobre os sulfetos interceptados pelas sondagens.

## Especificações do VTEM no Brasil

Apesar de o sistema VTEM permitir que o cliente defina muitos dos parâmetros de aquisição, a maioria dos vôos no Brasil é conduzida com as configurações *default*, que são as seguintes:

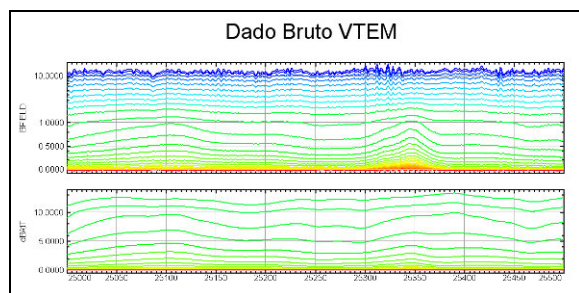
- Freqüência de base: 30 Hz.
- Forma da onda transmitida: Trapezoidal.
- Momento de dipolo médio: 220.413.
- Pico do momento de dipolo (NIA) 500.000.
- Altura do transmissor (TX): 30 metros.
- Altura do receptor (RX): 30 metros.
- Configuração: Rx e Tx concêntricos.
- Velocidade de aquisição: 25 m/s.
- Taxa de amostragem: medidas aproximadamente a cada 2,5 metros.
- Janelas de tempo do receptor: 25 v( 0,12 a 7,2 ms).

## Processamento VTEM

Uma boa parte do processamento dos dados adquiridos pelo sistema VTEM é muito similar ao processamento de dados de aeronaves de asa fixa com sensores magnéticos e gamaespectrométricos. Os processamentos dos dados magnéticos, do radar altímetro e do GPS, assim como as correções dos erros de paralaxe, não serão abordadas neste artigo, por serem comuns a maioria dos processamentos geofísicos de dados aerotransportados, os quais são razoavelmente bem discutidos na literatura especializada, como em Horsfall (1997).

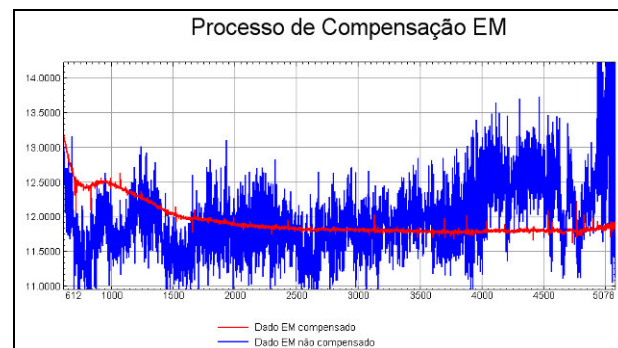
O processamento dos dados eletromagnéticos (EM) do sistema VTEM pode ser resumido em três etapas chave e bem distintas: compensação eletromagnética, filtragem e nivelamento / *nulling*.

A figura 1 mostra um exemplo de como são os dados brutos, tanto BField como dB/dT, extraídos diretamente do arquivo de gravação *on board*. Nenhum processamento foi aplicado. Como pode ser observado, os dados entre canais estão abertos, isto é, não nivelados e é possível localizar uma alta freqüência, principalmente nos canais recentes, provavelmente de origem não geológica.



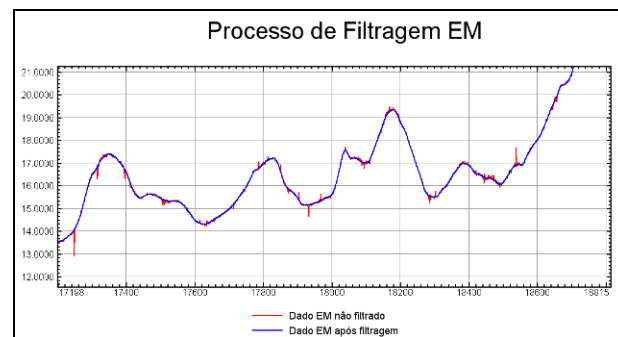
**Figura 1** Exemplo dos dados brutos de BField e dB/dT do sistema VTEM.

Após o controle de qualidade onde são verificadas a integridade dos dados EM, checando-se principalmente a incidência de eventos esféricos durante o vôo, *drifts* e ruídos anormais, todos os canais EM são compensados de movimentos indesejados da bobina receptora, gerados principalmente por ventos e manobras bruscas. A figura 2 mostra um exemplo da compensação da janela 0,12 ms do dado BField. O processo eletrônico de compensação do VTEM foi desenvolvido integralmente pela GEOTECH sendo patenteado e é de divulgação restrita. Contudo, é importante salientar que o algoritmo de compensação da GEOTECH não envolve nenhum tipo de filtragem, preservando a integridade do espectro de freqüências do conjunto de dados.



**Figura 2** Exemplo do resultado da compensação do canal BField para a janela 0,12 ms para uma área sem anomalias condutivas.

Posteriormente ao processo de compensação, são aplicados filtros do tipo não linear e passa-baixa. Os graus dos filtros dificilmente são maiores que 4 pontos para o não linear e 15 pontos para o passa-baixa. A figura 3 mostra o resultado da filtragem em comparação ao dado compensado. Como se pode notar, o conjunto de filtros é ajustado para eliminar *spikes* gerados pelo movimento (*swing*) do sensor EM e pequenas pulsações de eventos esféricos, sem alterar comprimentos de onda das anomalias de interesse exploracional.

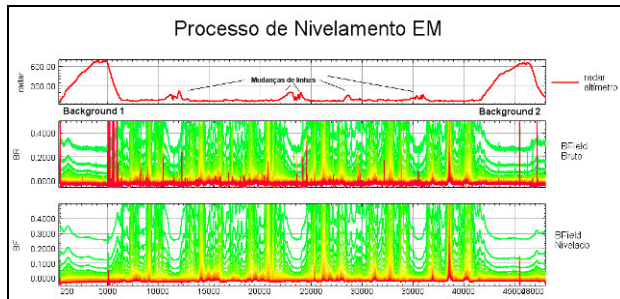


**Figura 3** Exemplo do resultado da filtragem do BField para a janela 0,12 ms para uma zona anômala. Um conjunto de filtros não linear e passa baixa é aplicado para retirar somente os efeitos não-geológicos dos dados EM, preservando os comprimentos de onda de possíveis anomalias de interesse econômico.

Conforme destacado anteriormente, a alta razão sinal-ruído do sistema VTEM permite que os dados EM sejam pouco filtrados, aumentando a resolução espacial e incrementando a precisão das profundidades estimadas no processo de inversão EM. Contudo, em situações

geológicas específicas torna-se necessário a aplicação de filtragens mais fortes do que o padrão utilizado nos processamentos brasileiros até o momento. Um exemplo são as anomalias condutivas de interesse para a pesquisa de urânio na península do Atabasca no Canadá. Devido às grandes profundidades das fontes anômalas, é comum que levantamentos VTEM executados nesta área sejam filtrados de forma mais forte, pois o comprimento de onda das anomalias de interesse é grande.

Após a filtragem, inicia-se o processo de nivelamento ou *nulling* do dado. Para isto, utilizam-se os testes de background que são executados ao longo do voo. O primeiro painel da figura 4 mostra o perfil do radar altímetro para um voo completo. Nele é possível visualizar as manobras para o teste de altitude e também as manobras de saída e entrada de linha do helicóptero.



**Figura 4** Exemplo do resultado de um voo completo com dois testes de altitude (*background*). O painel superior mostra o perfil do radar altímetro e os momentos do teste de altitude e de mudanças de linhas. O painel central mostra o dado bruto BField. O painel inferior mostra o BField nivelado utilizando-se os testes de altitude no início e final do voo.

A maioria dos sistemas EM aéreos, tanto em asa fixa como móvel, nos domínios do tempo e da frequência, utiliza-se de testes em altitudes para achar qual é a resposta zero do sistema. O teste em altitude é crítico para se obter um correto “ponto-zero” do sistema EM e conseqüentemente imagens interpretáveis sem desnivelamento entre vôos. Contudo, este tipo de teste é caro, pois exige um considerável gasto de combustível e tempo com o deslocamento da aeronave para uma altitude maior do que a nominal do levantamento, além de ser muitas vezes afetado por reflexões nas camadas da atmosfera da onda eletromagnética emitida, que está muitas vezes estratificada em termos de condutividade.

A definição da altitude ideal do teste de background depende das condutividades e espessuras do manto de intemperismo na área do levantamento. Em terrenos intensamente intemperizados como no Brasil, onde o perfil saprolítico pode chegar facilmente a mais de 50 metros, o teste em altitude deve ser conduzido algumas centenas de metros mais altos do que em terrenos onde o embasamento está exposto. Pois, mesmo estando longe da superfície terrestre, o sistema ainda pega influências do manto de intemperismo condutor, não permitindo zerar o sistema.

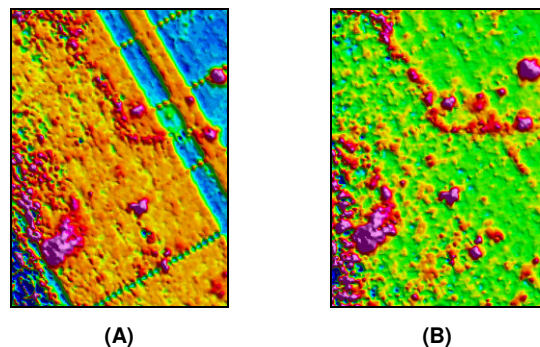
Na nossa experiência brasileira, observa-se que é muito difícil generalizar por regiões. Muitos levantamentos VTEM conduzidos na região norte, com destaque para a

região centro-sul do Mato Grosso e norte do Pará, apresentaram uma forte resposta mesmo em altitudes elevadas (por volta de 2.500 pés), como esperado. Surpreendentemente, em levantamentos em torno da Serra dos Carajás, testes de altitude nivelados em 2.000 pés eram mais que suficientes, devido ao pouco espaçamento do manto de intemperismo.

Pela maior exposição do embasamento, muitos levantamentos VTEM no nordeste brasileiro são facilmente niveláveis. Contudo, nesta região deve-se evitar conduzir testes de altitude sobre zonas de falhas que são condutoras pela percolação de água salobra.

Para lidar com tal diversidade de espessuras de mantos de intemperismo variáveis no Brasil, sempre que possível, os pilotos da MICROSURVEY são orientados a executarem as linhas de controle antes das linhas de produção. Tal procedimento tem duas vantagens, uma em segurança, pois a tripulação conhece a área de voo e seus riscos (fios de alta tensão não sinalizados, torres de telefonia, escarpas íngremes e etc.). A outra é o mapeamento das zonas menos condutoras do bloco de voo, definindo as áreas preferenciais onde deve-se executar os testes de *nulling* do sistema.

Conforme será discutido a seguir, imagens EM interpoladas (grids) têm sido cada vez mais utilizadas na interpretação de sistemas com o transmissor e o receptor concêntricos como o VTEM. Portanto, o processo de nivelamento EM fica cada dia mais importante e crítico na avaliação de um levantamento EM. Para exemplificar a importância de um nivelamento correto, a figura 5 mostra uma comparação entre uma imagem do dado bruto e uma imagem nivelada. As faixas da imagem em (A) são devidos a diferentes pontos de *nulling* entre vôos distintos. Após o processo de nivelamento, imagem (B), os dados EM são todos referenciados a um mesmo ponto zero, gerando uma imagem final muito mais limpa e portanto interpretável.



**Figura 5** Comparação entre uma imagem EM do canal dB/dT com 5,5 ms bruto em (A) e após nivelamento em (B).

### Interpretação

Grças ao desenvolvimento da micro-computação e do sistema GPS a interpretação de dados aeroeletromagnéticos está cada dia mais simples. Em questões de horas após um determinado voo os clientes do VTEM, de posse de imagens interpoladas EM, já podem planejar detalhamentos terrestres por mapeamento geológico e geoquímico.

Este dinamismo na exploração mineral é, no ponto de vista do autor, um dos grandes *appeals* da aerogeofísica moderna. Rapidamente um projeto pode ser avaliado e conseqüentemente custos com geoquímica e geologia são reduzidos ao se diminuir o tempo e área no detalhamento terrestre.

Embora, esta tendência de se avaliar um levantamento EM somente através de imagens interpoladas seja tentadora, muitas vezes é perigosa. Uma interpretação EM precisa deve ser baseada principalmente na inspeção dos perfis eletromagnéticos, de preferência associados a perfis do radar altímetro, do monitor de linhas de alta tensão e do campo magnético total e de suas transformadas.

Conforme discutido a seguir, a interpretação VTEM é dividida em duas análises distintas, a qualitativa e a quantitativa. Contudo, em ambas é fundamental a experiência do interprete para identificar diretamente nos perfis quais anomalias condutivas refletem condutores no embasamento local, normalmente de interesse econômico, e quais refletem anomalias geradas no manto de intemperismo ou por outras fontes sem interesse econômico.

#### interpretação qualitativa

A interpretação qualitativa deve preceder à quantitativa. Nesta etapa os perfis VTEM são inspecionados e as anomalias condutivas de interesse são selecionadas e classificadas conforme os seus TAU's, números de canais que a definem e se são isoladas ou parte de um *trend* longo, que pode sugerir uma origem litológica, camada de grafita, por exemplo. Esta etapa é chamada na língua inglesa de *picking*. O processo de *picking*, normalmente é demorado e dependente da experiência do interprete.

Existem no mercado algoritmos de *auto-picking* que geram produtos automáticos, normalmente fornecidos pelas empresas aéreas como produtos "interpretativos". Estes produtos são na maioria das vezes perigosos, quando não editados por um interprete experiente. Na nossa experiência observa-se que produtos automáticos geram muitas anomalias falsas que confundem os usuários, normalmente geólogos, tirando o foco das principais anomalias associadas a condutores no embasamento.

O *picking* manual apesar de ter um custo de dezenas de vezes mais elevado que o automático é o ideal, principalmente quando executado integrado a mapas geológicos de detalhe e regionais, geoquímicos e de outros dados aerogeofísicos. Neste caso, o intérprete utiliza sua experiência geofísica como geológica para selecionar e priorizar as anomalias condutivas, conduzindo o projeto de exploração diretamente para as áreas de maior probabilidade de sucesso, reduzindo os custos com *follow-ups* desnecessários.

Imagens de condutividade aparente e de TAU's são muito úteis para uma interpretação preliminar e expedita. Ao visualizá-las, rapidamente pode-se definir *follow-ups* preliminares. Por serem produtos baseados em imagens interpoladas, não podem e nem devem substituir a inspeção visual de cada perfil em uma interpretação mais cuidadosa.

#### interpretação quantitativa

Com a alta resolução espacial dos sistemas EM helitransportados, como VTEM, as informações da geometria, atitude e profundidade dos corpos causadores são cada dia mais precisas, permitindo sondar-se diretamente a partir dos dados aéreos as fontes condutivas.

Alguns trabalhos, como Taylor (2005), mostram os resultados das sondagens de condutores VTEM modelados principalmente no software australiano *MaxWell*. Os resultados são impressionantes. A maioria dos autores, normalmente geofísicos de mineradoras consagradas, mostra que os erros das profundidades estimadas na inversão do VTEM são da ordem de 15 metros, sendo que a totalidade dos furos interceptou litologias condutivas quando não estavam sulfetados.

Os autores ainda percebem certa resistência das empresas brasileiras em se sondar diretamente os alvos VTEM. Provavelmente devido ao costume e maior segurança na execução de geofísica terrestre e a falta de experiência na análise de dados EM aerotransportados.

Artigos recentes como Frutching *et al.* (2009) e Henrique *et al.* (2009) já mostram que no Brasil é viável e economicamente muito interessante sondar anomalias VTEM diretamente, sem detalhamento geofísico terrestre. Henrique *et al.* (2009) mostra um exemplo no Brasil onde a associação de sondagens direta de anomalias VTEM associadas à perfilagens EM de furo é uma ferramenta muito eficiente e com ótimo custo/benefício principalmente na pesquisa de sulfetos de níquel.

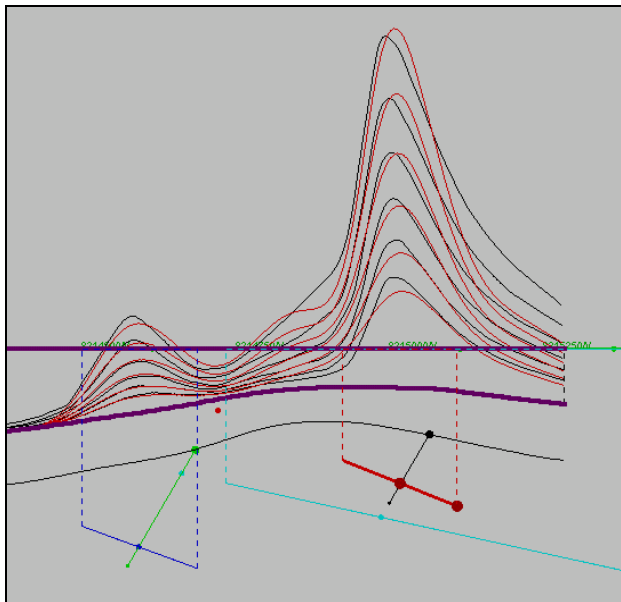
Atualmente, como ferramentas exploratórias usuais, existem basicamente dois tipos inversões de dados EM aéreos. Softwares que criam modelos discretos, como o *MaxWell* e softwares que geram imagem de condutividade em profundidade CDIs (*conductivity depth images*), como *EMax* e o *EMFlow*. As inversões tridimensionais são atualmente possíveis, mas existe um consenso entre os especialistas que a efetividade dos softwares de EM 3D é limitada e que os resultados são na maioria das vezes decepcionantes após dias de processamento intenso.

A figura 6 mostra um exemplo de inversão VTEM no software *Maxwell*. Este software tem sido muito usado para a locação de furos no teste de anomalias VTEM. Os pontos positivos deste programa estão na boa precisão de profundidades dos corpos condutores como mostrado por Taylor (2005) e na rapidez das inversões. O principal ponto negativo está na dificuldade em lidar com canais EM com efeito de coberturas condutivas.

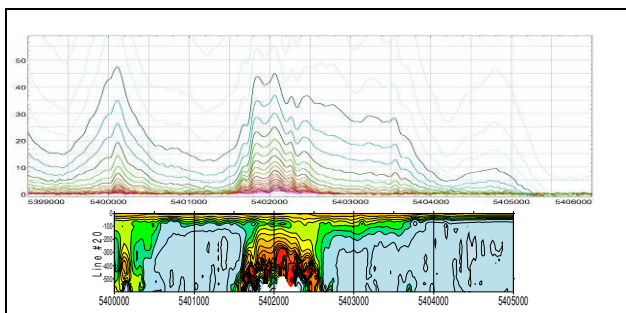
Os softwares como o *EMax* e o *EMFlow* geram CDIs como um exemplo mostrado na figura 7. O grande atrativo de CDIs é que os dados de EM em perfil ficam "fáceis" de serem interpretados, analogamente às inversões de dados de polarização induzida. São produtos que normalmente os não-especialistas gostam muito. Não há dúvidas em as imagens CDIs podem trazer muitas informações geológicas que podem ter relevância na prospecção. Entretanto, a interpretação delas por não especialistas é sempre perigosa, pois, modelos quase-automáticos como CDIs podem gerar falsas anomalias no



embasamento e conseqüentemente desperdícios desnecessários de verbas do projeto.



**Figura 6** Exemplo de inversão de duas anomalias VTEM no software Maxwell.



**Figura 7** Exemplo de produto interpretativo tipo CDI (*conductivity depth image*) para uma seção de VTEM sobre mineralização conhecida.

### Conclusões

Os sistemas EM helitransportados do domínio do tempo, como VTEM, marcam uma nova fase na pesquisa de sulfetos maciços no mundo. No Brasil, desde 2005, a aplicação do VTEM é intensa. Tal metodologia tem tido bastante sucesso em detectar corpos sulfetados de dimensões variadas, incluindo depósitos estreitos e de baixa tonelagem. Contudo, no Brasil, pouco se fala e se entende sobre as premissas básicas de processamento e interpretação deste sistema.

As partes chaves do processamento VTEM estão em uma boa compensação do dado EM, na correta filtragem e em um nivelamento através de dados em testes de altitude bem adquiridos.

Com os dados corretamente processados, a interpretação de imagens interpoladas VTEM é muito facilitada pela concentricidade entre transmissor e receptor e a alta razão sinal-ruído do sistema. Rapidamente pode-se avaliar uma área em termos de

sua prospectividade para sulfetos maciços, reduzindo drasticamente os custos exploratórios.

Contudo, uma interpretação criteriosa de VTEM deve ser baseada principalmente na correta inspeção dos perfis EM. O entendimento de quais anomalias realmente refletem condutores de interesse econômico é fundamental para não haver desperdícios de recursos financeiros do projeto. Este entendimento deve ser diretamente nos perfis EM, isto é, independente de softwares de inversão ou algoritmos de imageamento em planta.

Os softwares comerciais de inversão de dados EM são ferramentas importantes na interpretação quantitativa de dados VTEM. As profundidades calculadas assim como as geometrias das fontes causadoras são estimadas com precisão suficiente para sondagem direta. A possibilidade de se sondar diretamente anomalias VTEM sem detalhamento terrestre é uma realidade. Quando possível, tal procedimento reduz drasticamente os custos na exploração de sulfetos.

### Agradecimentos

O autor agradece a RECONSULT GEOFÍSICA por incentivar a edição deste artigo. Em especial ao geofísico Renato Cordani pelas inúmeras discussões técnicas e revisão final do texto.

### Referências

- Combrick, M e Lo, B (2008). VTEM improvements to meet exploration challenges demonstrated at Caber and Fox River Projects. 10<sup>th</sup> SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition.
- Fruchting A., Bonniati J. H., Henrique E., Diniz O. G. e Oliveira B. S (2009). Aplicação conjunta dos métodos eletromagnéticos aéreos e de polarização induzida espectral em mineralizações de cobre/zinco tipo VMS no Projeto Rio do Peixe, Goiás. Eleventh international congress of the Brazilian geophysical society.
- Henrique E., Batista S. e Fruchting A. (2009). Aplicação conjunta dos métodos eletromagnéticos aéreo e de furo na pesquisa de níquel sulfetado em Goiás. Eleventh international congress of the Brazilian geophysical society.
- Horsfall, K.R. (1997). Airborne magnetic and gamma-ray data acquisition. In AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, vol. 17, number 2, 1997.
- Taylor, S (2005). Drilling from VTEM data. Oral presentation at PDAC 2005, Toronto, Canada.
- Witherly, K., Irvine, R. e Morrison, E.B. (2005). Update on the Geotech system: improvements to the technology and recent applications. KEGS airborne geophysics workshop, March 2005, Toronto, Canada.