



# An Improved Microlevelling Algorithm

Rodrigo Felício Fuck\*

## Abstract

Frequently geophysical gridded images are plagued by high frequency artifacts parallel to survey lines that diminishes their resolution. Such high frequency content reflects uncorrected levelling errors and poor survey design. In this expanded abstract an improved microlevelling algorithm is shown that can be used to effectively remove this undesired high frequency noise, thus dramatically improving spatial correlation in images. One of the main advantages of this new microlevelling algorithm is that it enables much more control by the user over the corrections applied than previous microlevelling methods such as decorrugation.

## Introduction

The main objective in producing gridded images from geophysical point-located data is to assess how information spatially correlates from one survey line to another, therefore achieving a much more comprehensive view of the measured physical properties of rocks in a given region. The increase in computational power has enabled the growing use of various kinds of interpolation procedures to produce such images. However the latter are unable to address intrinsic survey limitations that can drastically decrease the usefulness of gridded images.

Often in mineral exploration, surveys are designed as a series of 2D profiles, thus producing a database with two different Nyquist cut-off frequencies, one along the survey lines and another across lines. The bigger the difference between them the more difficult it is to produce a sharper image, because not only are the high frequency signals along one line more unlikely to correlate with their counterparts on an adjacent line, but also measuring apparatus and weather conditions can produce significant non linear drifts from one line to another. Hence the persistence, even after common levelling procedures, of pervasive high frequency noise parallel to survey lines that blurs geophysical grid images and hinders proper understanding of lateral variation of measured properties. Moreover if transformations such as derivatives, which

enhance high frequencies and therefore are prone to decrease the S/N ratio, are applied to the data, noise can render the results useless.

In order to circumvent those problems and survey limitations fine-tune levelling or 'microlevelling' of point-located data methods have been devised. In the literature microlevelling methods are implemented in two ways: one in the space domain and the other in the wavenumber domain. The latter is also called 'decorrugation' and comprises the use of directional cosine and Butterworth filters over the FFT transformed original grid to generate a correction grid which is then subtracted from the former grid or point located data. Unfortunately decorrugation lacks the necessary flexibility to address the non-linearity of the problem. On the other hand the space domain microlevelling - as introduced by Minty (1991) - allows much more user control over corrections since one can define the dynamic range of error amplitudes to be correct, for instance. Another advantage is that space domain microlevelling avoids shortcomings of FFT routines that usually introduce high frequency noise when padding grids in order to make them 'periodic'. Furthermore, space domain microlevelling can be used in gamma ray spectrometric data whereas it does not make sense to apply a FFT on such data type. Unfortunately, as pointed out by Luyendyk (1997), Minty's microlevelling is unable to differentiate between geological signal and noise which are parallel to line survey directions. Moreover very often it is necessary to apply more than one run of the method until an acceptable result is achieved. An attempt to overcome these limitations is made here by implementing improvements on Minty's microlevelling algorithm.

## Method

Basically microlevelling is about constructing a correction grid which should be sampled in accordance with and applied to the original point-located data, so that the typically elongated parallel to the survey lines spurious anomalies or mismatches can be eliminated. Minty (1991) proposed to construct this correction grid in a two step fashion based on a trial-and-error procedure: Firstly a high-pass filter is run across survey lines directions, with a cut-off frequency equal to 1 to 3 times the line spac-

---

\*Laboratório de Geofísica Aplicada - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Campus Universitário, Brasília, DF, Brazil, 70910-900. e-mail: fuck@unb.br

## Improved microlevelling

ing. Then, over the resulting grid a low-pass filter is run parallel to survey lines direction with a cut-off frequency equal to 1 to 2 times tie lines or control lines spacing. The outcome is a correction grid comprised of a series of stripes parallel to survey lines. Each time the user should verify whether the dynamic range of amplitudes used is indeed appropriate or else the microlevelling will either introduce or enhance errors due to correction overshooting or will not eliminate the undesired anomalies. If results are acceptable the output grid should be sampled according to point-located data and the corresponding channel in the database should be low-pass filtered prior to actually adding up the corrections to the original data. Following suggestions from Luyendyk (1997) the improved microlevelling algorithm use as a high-pass filter a Naudy type non-linear filter (Naudy and Dreyer, 1968, for details) instead. After some simple comparison between algorithms that use linear filter and that using Naudy non-linear filter it is clear that the latter delivers remarkably superior microlevelled grids. Moreover it provides the algorithm with power enough, provided the dynamic range is set properly, to correct even serious levelling errors.

In the author's experience when microlevelling one should make a compromise between the necessity to eliminate artifacts and the need to preserve geological signal parallel to survey lines. This commonly leads to less than satisfactory results. To overcome such a handicap the microlevelling algorithm has been provided with the capability to build windows over the database where corrections could be more stringent (i.e., higher cut-off frequencies or broader dynamic range should be used) or milder or even not applied at all. Hence the improved microlevelling algorithm is able to handle specific problems after the best possible general correction has been found for a given dataset. Therefore, instead of submitting all the point located data to a new round of microlevelling to eliminate the newly introduced and/or remaining artifacts - thus risking further undesired modifications - the user can focus the procedure over a limited location, preserving the already good corrections. Furthermore, the algorithm is able to deal with cases when in spite of achieving a generally good result, some geological features have become blurred or have been wiped out of the final image. By simply constructing a window where no corrections are allowed, it is possible to restore the original shape of selected geological signals which happen to be parallel to survey lines. Finally it is

also worth mentioning that the ability to selectively apply corrections has rendered the whole microlevelling process faster: the time consuming task of finding a best compromise between noise suppression and signal retention is significantly reduced because it no longer should address all or almost all the errors in a survey.

## Examples

The following examples are used to illustrate firstly the superiority of the improved microlevelling algorithm over the less flexible FFT-filtering based decorrugation procedure and secondly its capability to preserve geological signal.

Figure 1 displays the previously levelled residual magnetic intensity field (i.e. the regional magnetic intensity has been stripped from the data) from an area near to the magnetic equator in Brazil. Clearly, the image is contaminated by elongated anomalies which are parallel to the N-S flight line direction. To eliminate them the grid in Figure 1 has been filtered using the improved microlevelled algorithm and the commonly applied decorrugation method, the results being showed in Figures 2 and 3, respectively. Firstly, Figure 3 shows that decorrugation should have been very stringent, since it has the appearance of a low-pass filtered image. In fact the cosine filter had been adjusted to its maximum aperture around the N-S direction and the high-pass filter had to use as cut-off frequency the value of 8 times the line spacing. Moreover, decorrugation is not able to restrict corrections so to obey a dynamic range, therefore it can significantly alter signals of any amplitude whether or not they are noise. Despite that decorrugation was unable to correct some vertical alignments and the levelling problem in the western part of the image. By contrast, the microlevelling method (Figure 2) used much more mild corrections, in general - 2 times line spacing as cut-off frequency for the non-linear filter and the corrections were restricted to a -50 to 50 nT range - and was able to produce a much better output with a plus that comes with the correction of the unlevelled stripe that is in the western part of the survey area. Moreover the microlevelled image retains much of the short wavelength signals which are produced by geological signal thus making it easier to identify subtle structures like dykes, faults and trends that were blurred in the original image and that have been too much smoothed by decorrugation.

Figures 4 and 5 illustrate quite well how the

## Improved microlevelling

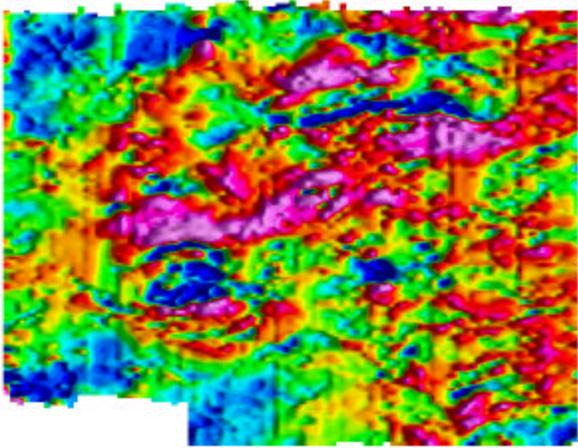


Figure 1: Shaded-relief image (sun due East) of a residual magnetic intensity field from an area close to the magnetic equator in Brazil. Despite being previously levelled by the contractor the survey is clearly degraded by elongated anomalies parallel to flight lines.

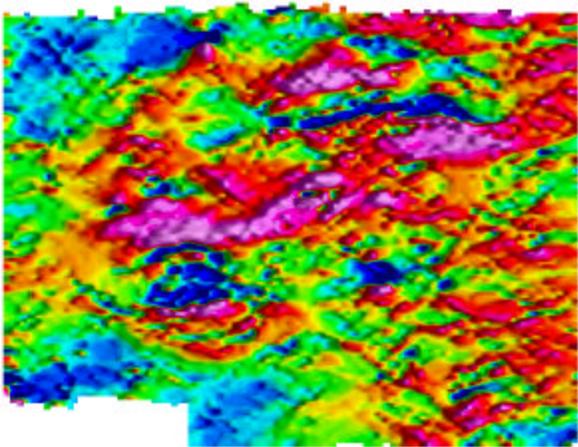


Figure 2: The resulting shaded relief image (sun due East) after the grid in Figure 1 was microlevelled using the proposed algorithm. Note that it was capable of correcting the strong levelling error originally located at the western part of the image. North is upwards.

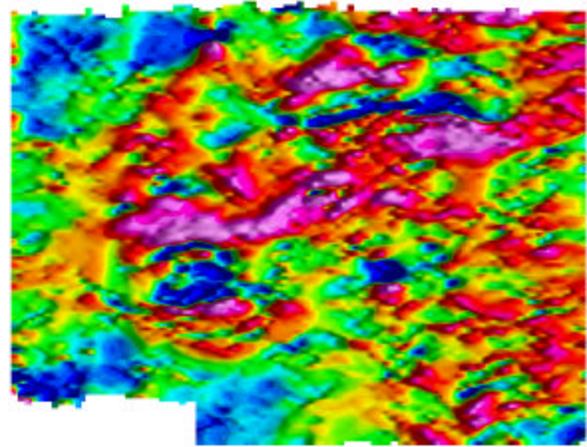


Figure 3: The output shaded-relief image (sun due East) from decorrugation from the grid in Figure 1. Although much of the high frequency content was eliminated the image still suffers from alignments parallel to flight line direction. Also decorrugation could not correct the levelling problem in the western part of the map.

window building capability can be deployed in other to preserve the response of N-S trending features, i.e., parallel to flight line direction. Also, the choice of the uranium channel is twofold. On one hand it demonstrates that the method can be extended to enhance the images of different kinds of geophysical data other than magnetics. On the other hand it is aimed at showing how efficient the improved microlevelling algorithm is when it comes to handle very noisy datasets - the uranium channel is by far the most problematic channel to apply corrections in gamma-ray spectrometry (Minty et al., 1997, for details).

By comparing Figures 4 and 5 it becomes clear that the microlevelling was able to produce a remarkably result. The spatial coherence of the image was greatly enhanced while almost all of the spurious elongated anomalies have been wiped out. Moreover, significant levelling errors have been considerably smoothed as can be noticed by observing that the stripe of low (blue-colored) values indicated by the black arrow in Figure 4 has practically disappeared from Figure 5. Note, however, that the river signal (conspicuous in the images as coherent distribution of very low values - deep-blue colored - running from the bottom western part to the image top center) within the stripe indicated by the black arrow has been preserved and enhanced. Using previous implementations of microlevelling or

## Improved microlevelling

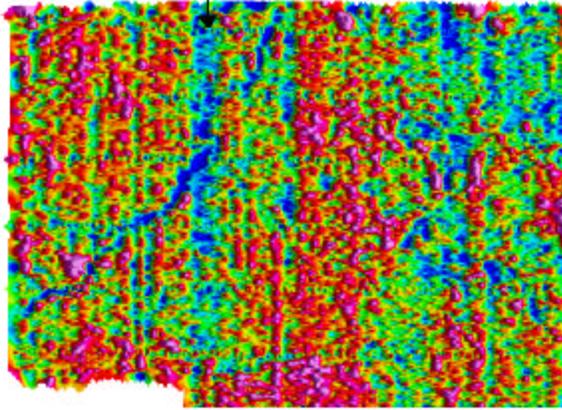


Figure 4: The uranium channel from the same area previously depicted in Fig.1 as delivered by the contractor. North points upwards.

even decorrelation this kind of customised correction was impossible, and the user would be faced with the dilemma of whether to destroy or to preserve the river signal in order to correct the low value stripe that contains it. By simply building a polygon window encompassing all of the river signal that dilemma is circumvented as well as others which may arise as there are several locations along the river where it also strikes N-S. In this particular case the window has been built from the potassium channel since it displays a sharper picture of the river margins.

## Conclusion

In this expanded abstract an improved microlevelling algorithm has been presented. Its main new feature is the ability to build windows where corrections can be fully customised for a given region inside the survey area. This new feature allows microlevelling to overcome two important shortcomings of previous algorithms. Firstly, it is now capable of preserving geological signal parallel to survey lines without detriment to noise elimination. Secondly, it greatly reduces the amount of compromise one should make in order to achieve an acceptable result, enabling the elimination of a greater amount of elongated spurious anomalies. A by-product of the new window building capability is the significant decrease in processing time need to achieve outstanding results.

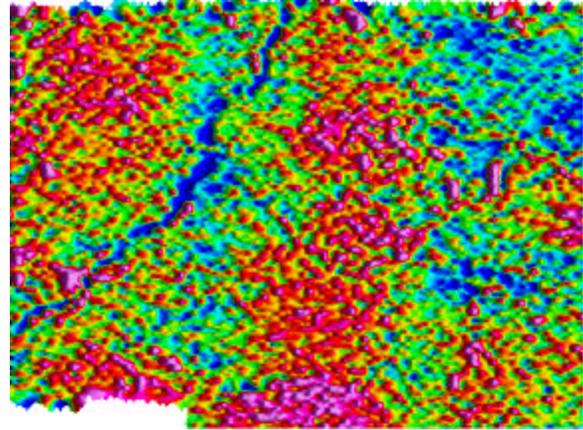


Figure 5: The resulting microlevelled grid shown as shaded relief image (sun due East). The improvement on spatial correlation is striking. Also, note that no correction was applied to the river shown by deep blue colour running from the western edge of the area towards top center.

## Acknowledgments

This research was sponsored by CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) through a RHAe fellowship process number 610287/96-6. The author thanks the invaluable comments and discussions concerning microlevelling with Professors A.C.B. Pires, R.A.V de Moraes and M.L.B. Blum.

## References

- Luyendyk, A. P. J., 1997, Processing of airborne magnetic data: AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, **17**, no. 2, 31-38.
- Minty, B. R. S., Luyendyk, A. P. J., and Brodie, R. C., 1997, Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry: AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, **17**, no. 2, 63-76.
- Minty, B. R. S., 1991, Simple micro-levelling for aeromagnetic data: Expl. Geophys., **22**, 591-592.
- Naudy, H., and Dreyer, H., 1968, Non-linear filtering applied to aeromagnetic profiles: Geophys. Prosp., **16**, 171-178.



## **Anomalias de Suscetibilidade Magnética do Batólito de Teixeira (Província Borborema) e sua relação com a Zona de Cisalhamento de Itapetim.**

Rosenberg Garcia Lima, PETROBRAS.

Carlos José Archanjo, GMG/IG/USP

José Wilson Paiva Macedo, DFTE/UFRN

### **Abstract**

The batholith granitic of Teixeira forms a large ENE-trending dyke of 80 km along and 10 km wide emplaced between pelitic metasediments and “Cariris Velhos” orthogneisses. The batholith was locally deformed by shear zones, the most important the NE-trending Itapetim Shear Zone (ISZ) which cross cut the eastern part of the dyke. In the gneiss situated in the southern part of the batholith, the ISZ host gold bearing quartz veins of the Itapetim District. A detailed magnetic study on the batholith show high susceptibilities ( $> 10^{-3}$  SI) near fault and fractures zones that decrease in magnitude ( $< 0.5 \times 10^{-3}$  SI) far from deformed zones. Thermomagnetic data and hysteresis parameters of the high susceptibility rocks revealed that the main carrier of susceptibility is a multidomain, Ti-poor magnetite. The mean coercivity around 4.8 mT indicates that the magnetic properties are yielded by finest magnetite particles ( $< 10 \mu\text{m}$ ). MEV backscattering examination found nearly equant magnetite grains varying from 180  $\mu\text{m}$  down to 5  $\mu\text{m}$ . Some grains display fine, discontinuous stripes of hematite occupying octahedral planes. Barite veins cross cutting the silicate framework and cavities infilled by microcrystalline quartz and TR-enriched allanite hosted in magmatic quartz crystal indicates that an oxidizing hydrothermal environment was associated with shear zone deformation. The relation between fluid fluxes within this segment of the Itapetim shear zone and evolution of the gold mineralization is discussed.

### **Introdução**

No mapa aeromagnético das Folhas Patos e Juazeirinho (PLGB, Sheid & Ferreira, 1991), foram definidos anomalias dipolares de forma elipsoidal, caracterizadas pela alternância de baixas ( $< 50$  T) e altas amplitudes ( $> 150$  T) magnéticas, tanto no interior do Batólito Granítico de Teixeira (BT), como ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim (ZCI), situada a sul do BT.

Estas anomalias foram relacionadas à presença de corpos máficos em profundidade ou à diferenciações para litologias magnéticas associadas ao metamorfismo de contato (Sheid & Ferreira, 1991).

A provável presença de rochas máficas e/ou processos de enriquecimento em minerais ricos em ferro, ao longo dos lineamentos magnéticos, possui implicações no estudo da gênese e evolução das mineralizações auríferas dos distritos de Itapetim e Mãe D'Água. Neste trabalho investigam-se a origem das anomalias/lineamentos magnéticos no BT através do estudo da suscetibilidade magnética e da anisotropia.

### **Suscetibilidade ( $K$ ) e Anisotropia Magnética ( $P$ )**

A magnitude de  $K$  varia de  $0,06 \times 10^{-3}$  SI a  $16,46 \times 10^{-3}$  SI, com um valor médio de  $1,73 \times 10^{-3}$  SI. A maioria desses valores (60,15%) são menores que  $0,5 \times 10^{-3}$  SI, indicando que o BT possui suscetibilidade típica dos granitos a ilmenita ( $K < 10^{-3}$  SI; Ishihara 1979). Em 30,43% das amostras, notadamente próximo a zonas de falhas, a suscetibilidade é superior a  $1,0 \times 10^{-3}$  SI. Esses dois comportamentos diferenciam as regiões onde a suscetibilidade magnética apresenta uma forte contribuição dos minerais paramagnéticos, das regiões onde a fração ferromagnética *s.l.* domina a suscetibilidade.

A anisotropia magnética varia de 1% a 35% ( $P\% = 0$  equivale a uma esfera), com um valor médio de 8%. A maior parte dos valores de anisotropia (76,81%) são inferiores a 10%, o que poderia indicar uma forte contribuição dos minerais paramagnéticos à anisotropia.

Nenhuma correlação direta foi observada entre  $P$  e  $K$ . Contudo, pode-se notar que a variação de  $P$  é mínima para  $K < 0,5 \times 10^{-3}$  SI e forte para  $K > 1,0 \times 10^{-3}$  SI. Isto sugere que a variação da anisotropia magnética depende tanto da mineralogia que domina a suscetibilidade, como da petrografia.

### **Mineralogia Magnética**

As variações de suscetibilidade e anisotropia magnética estão fortemente controladas pela presença de minerais para- e ferrimagnéticos no granito. A caracterização destes minerais foi feita através da obtenção da temperatura de Curie, da determinação dos parâmetros do ciclo de histerese e da identificação mineralógica através do microscópio eletrônico.

### a) Temperatura de Curie

Foram selecionadas 10 amostras do BT para a confecção de curvas termomagnéticas, todas situadas em torno da ZCI no domínio de forte suscetibilidade.

As curvas de aquecimento e resfriamento de todas as amostras são extremamente semelhantes. Com o aumento da temperatura a suscetibilidade sofre leves flutuações ou aumenta suavemente (efeito Hopkinson). No intervalo de temperatura entre 570 e 575 °C, o valor de  $k$  decresce abruptamente até valores negativos. Isto indica a presença da magnetita pobre em Ti (Hunt *et al.* 1995), cuja  $T_c$  situa-se em 575 °C. A curva no ciclo de resfriamento é similar a curva de aquecimento, indicando que o experimento ocorreu sem modificações químicas significativas.

### b) Propriedades de histerese

As curvas de histerese são feitas em campo magnético suficientemente forte para saturar a fração ferrimagnética. As curvas de histerese mostram que a suscetibilidade é dominada pela magnetita, como sugerido pela estreita cintura do *loop* próximo a origem do gráfico, o que é típico de minerais magnéticos de baixa coercitividade. A razão  $M_{rs}/M_s$  varia de 0,019 a 0,108, com uma média de 0,044. Esses valores situam-se próximos aos valores propostos para grãos multidomínio de magnetita (Dunlop 1986; Heider *et al.* 1996). Os valores de  $H_c$  situam-se entre 1,167 a 13,981 mT, com um valor médio de 4,89 mT. As razões  $M_{rs}/M_s$  e  $H_{cr}/H_c$ , quando plotadas no diagrama de Day *et al.* (1977), confirmam a natureza multidomínio a pseudo-monodomínio dos grãos de magnetita. Em três amostras a coercividade remanescente elevada ( $H_{cr} > 100$  mT) indica a presença de hematita e/ou misturas de hematita com um mineral de coercividade baixa, provavelmente magnetita.

Uma estimativa da granulometria da fração que fornece o sinal magnético pode ser obtida através da relação entre o tamanho dos grãos de magnetita, do campo coercitivo ( $H_c$ ) e da razão  $M_{rs}/M_s$  (Hunt *et al.* 1995).

### c) Caracterização mineralógica

A observação no microscópio eletrônico mostrou a magnetita como óxido dominante. Os grãos são, em geral, idiomórficos a subidiomórficos variando de 10 a 180  $\mu$ m, com alguns cristais exibindo partição paralela às faces octaédricas. O

difratograma composicional em vários pontos do centro e da borda da magnetita não detectou a presença do elemento Ti, como já havia sido sugerido pela análise das curvas termomagnéticas. Em algumas seções foi observado a presença de lamelas de hematita ocupando os planos octaédricos da magnetita. Nestas amostras foram também observadas cavidades preenchidas com alanita formando colunas ou botões. No difratograma destes grãos foram encontrados altos teores de Terras Raras, com picos nos elementos Ce, La, e Nd. Além da magnetita e alanita, foram identificados filonetes discordantes de barita ( $BaSO_4$ ) cortando os minerais silicatados e a magnetita.

### CONCLUSÕES

O Batólito Granítico de Teixeira apresenta suscetibilidade magnética relativamente baixa, inferior a  $0.5 \times 10^{-3}$  SI em 60 % de sua superfície, indicando uma significativa contribuição dos minerais paramagnéticos (biotita e anfibólio) sobre a suscetibilidade total da rocha. Os valores de suscetibilidade mais elevados estão restritos às regiões de borda e às zonas cisalhadas que cortam o corpo. Nestes domínios, a suscetibilidade pode localmente atingir magnitudes da ordem de  $10^{-2}$  SI. Medidas de temperatura de Curie e a observação ao microscópio eletrônico de varredura indicaram que a suscetibilidade elevada é fornecida pela magnetita pobre em Ti. As curvas de histerese mostraram que a estrutura da magnetita é do tipo multidomínio, sendo os parâmetros de histerese (coercividade e magnetização remanescente) controlados pelos grãos mais finos ( $< 10 \mu$ m). A forte coercividade remanescente em algumas amostras sugere a presença de hematita. A presença de hematita e barita associada a magnetita, indica que os processos hidrotermais que conduziram às anomalias de suscetibilidade foram relacionados a uma fonte hidrotermal de elevada fugacidade de oxigênio, com a circulação de fluidos controlada pela deformação cisalhante regional.

### Referências

- Day, R.; Fuller, M.D.; Schmidt V.A. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Int.* **13**, 260-267.
- Dunlop, D.J. 1986. Hysteresis properties of magnetite and their dependence on particle size: a test of pseudo-single domain remanence

- models. *Journal of Geophysical Research*, 91: 9569-9584.
- Heider, F.; Zitzelsberger A.; Fabian K. 1996. Magnetic susceptibility and remanent coercite force in grown magnetite crystals from 0.1 to 6 mm. *Phys. Earth Planet. Interiors* **93**, 239-256.
- Hunt, C.P.; Moskowitz B.M.; Banerjee S.K. 1995. Magnetic Properties of rocks and minerals. *Rock Physics and Phase relations, A Handbook of physical constants*, AGU Reference Shelf 3, 189-204.
- Ishihara, S. 1979. The magnetite series and ilmenite series granitic rocks. *Mining Geology*. **27**: 293-305.
- Scheid, C.; Ferreira, C.A. 1991. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Carta geológica, carta metalogenético-previsional - Escala 1:100.000 (folha SB 24-Z-D-I-Patos). Estados de Pernambuco e Paraíba*. Brasília, DNPM/CPRM. 148p.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Dr. José Salim, Coordenador do projeto PADCT, e ao CNPq pela concessão de bolsas de Mestrado e Produtividade em Pesquisa.



## Aplicação do Método da Polarização Induzida Espectral (SIP) na Descoberta do Depósito Breves, Província Mineral de Carajás-PA

J. L. do Rêgo <sup>(1)</sup>; A. R. Nunes <sup>(1)</sup>; R. Stevanato <sup>(2)</sup>; P. E. Lima da Silva <sup>(3)</sup>; F. J. F. Ferreira <sup>(2)</sup>; J. B. Siqueira <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Companhia Vale do Rio Doce, CVRD; <sup>(2)</sup> Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA/UFPR;

<sup>(3)</sup> Geoprospec, Prospecção Geológica Ltda.

### Abstract

The spectral induced polarization – SIP designate a variety of methods which look beyond the familiar resistivity and chargeability as measured in induced polarization surveys, that analysis electrical survey data at a number of frequencies or delay times. A set of quantities which characterize the information gained. The Cole-Cole impedance model is adopted for the study of the spectral IP effect's on time-domain measurements. The spectral induced polarization applied to near Igarapé Bahia gold mine exploration, makes possible, the detailed analysis of areas, pre-selected by induced polarization surveys, using gradient array. It has been useful for modeling and understanding chargeability anomalies in Breves deposit. Enable us to identify different types of anomalies, distinguishing disseminated sulfide concentrations related anomalies, from those related to membrane polarization effect, related to rocks composed dominantly by clay minerals, with carbonaceous material and manganese. The contribution of spectral induced polarization survey, carried out by CVRD and LPGA, comprises drilling optimization and exploration costs reduction. This paper presents as results, the characterization of Breves deposit. Cole-Cole analysis parameters signature, characterized by disseminated sulfide concentrations related to medium chargeability (**m**) and Tau (**t**) values, while high chargeability (**m**) and Tau (**t**) values, are relate to rocks with high contents of clay minerals, with manganese and carbonaceous material.

### Introdução

Recentemente, a equipe do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada - LPGA/UFPR, juntamente com geofísicos da Geoprospec – Prospecção Geológica Ltda e geólogos da Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, realizou levantamentos de polarização induzida espectral (SIP), no modo dipolo-dipolo, com o objetivo de testar a hipótese da CVRD, vinculada à existência de zonas sulfetadas primárias em profundidade, responsáveis pelas concentrações auríferas associadas com crostas lateríticas, *gossans* e veios de quartzo no denominado Alvo Breves, Mina do Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás-PA.

Na tentativa de rastrear as zonas sulfetadas em profundidade, foi feito um levantamento IP, no

arranjo gradiente (AB=1600 m), o qual mostrou grande eficiência na cobertura de grandes áreas a um custo reduzido. Neste levantamento foram identificadas anomalias de cargabilidade, sugerindo a presença de sulfetos disseminados em profundidade, o que suportou a locação de furos de sonda. Nessa campanha os furos interceptaram expressivos intervalos com sulfetos disseminados, preenchendo fraturas em padrão *stockwork*, mineralizados em Cu, Au, Ag, W, Sn, Mo e Bi. Com o objetivo de delinear detalhadamente as anomalias geradas pelo levantamento no arranjo gradiente e otimizar a sondagem, foi aplicado o método SIP.

O presente trabalho discute os resultados de SIP obtidos em duas linhas, selecionadas de um conjunto de nove seções, com 4.000 m de extensão cada, direção E-W, os quais suportaram novas perfurações pela CVRD. Do mesmo modo, os furos interceptaram intervalos significativos de minério, otimizando a campanha de sondagem no depósito Breves. Os trabalhos de pesquisa da CVRD ainda estão em fase de individualização dos corpos mineralizados, mas já indicam recursos da ordem de 50 milhões de toneladas de sulfetos mineralizados em cobre, ouro, prata, tungstênio, estanho, molibdênio e bismuto.

### O Método da Polarização Induzida Espectral

O método SIP pode adotar os modelos de impedância Cole-Cole (Pelton *et al.*, 1978) ou o de Dias (1972), para estudar os efeitos da polarização induzida espectral nos domínios da frequência (eg. Sampaio *et al.*, 1993) ou do tempo (eg. Johnson, 1990). A impedância complexa depende da resistividade -  $R_0$ ; da voltagem relativa residual registrada após a interrupção de um pulso muito longo (cargabilidade verdadeira - **m**); da constante de tempo - **t** e do expoente - **c**, os quais descrevem as formas das curvas de decaimento no domínio do tempo, ou o espectro de fase no domínio da frequência.

Para alvos convencionais de IP, **t** varia desde milissegundos até índices superiores a 100 segundos e está relacionada com a granulometria (*grain size*) dos minerais polarizáveis. O expoente **c** varia, via de regra, entre 0.1 e 0.5 e constitui um parâmetro relacionado à uniformidade granulométrica dos alvos. De acordo com Pelton *et al.* (1978), em geral, a constante de tempo é pequena em mineralizações de granulação fina, verificando-se o contrário quando a mineralização é grossa, o que pode permitir, por

## Polarização Induzida Espectral

exemplo, a discriminação entre grafita e outros minerais polarizáveis e sulfetos de interesse econômico. Estes últimos autores verificaram que os parâmetros espectrais  $c$  e  $R_0$  variam pouco com o tipo de mineralização e o primeiro deles é um fator independente e praticamente constante, enquanto  $t$  e  $m$  são os mais importantes e estão relacionados com os teores e a granulometria do minério. Os experimentos de Pelton *et al.* (1978) demonstraram que a discriminação espectral entre mineralizações disseminadas, maciças e em vênulas (*veinlets*), não depende da composição química mas sim do hábito ou da granulometria do minério. Após a remoção das distorções provocadas pelo acoplamento eletromagnético, os resultados são interpretados através de um programa de inversão, determinando-se os quatro parâmetros espectrais ( $R_0$ ,  $m$ ,  $t$  e  $c$ ), os quais fornecem a curva de dispersão Cole-Cole que mais se ajustou aos dados de *SIP* medidos, além do erro médio quadrático.

No modo Cole-Cole empregado na presente pesquisa, no domínio do tempo (2s), as curvas de decaimento medidas são comparadas com curvas teóricas calculadas com um expoente  $c$  fixo e igual a 0.25 e  $t$  entre 10ms e 100s, de modo que os dados apresentados deste último parâmetro correspondem às curvas teóricas que melhor se ajustaram aos dados observados. O sistema de polarização induzida utilizado nos ensaios, fabricado pela *Iris Instruments*, envolve um receptor multicanal (ELREC-10), um transmissor (VIP-3000) com potência máxima de 3kW, alimentado por um gerador Honda EM5000.

### Geologia e Mineralizações do Depósito Breves

O depósito Breves situa-se no Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, o qual hospeda a Província Mineral de Carajás (Docegeo, 1988). O Alvo foi inicialmente pesquisado pela Rio Doce Geologia e Mineração S.A. – Docegeo, nas décadas de 80 e 90. Os primeiros indícios das mineralizações revelaram fortes anomalias de cobre em sedimentos de corrente ( $> 400\text{ppm}$ ). O levantamento geoquímico de solo, posterior, resultou em anomalias discretas de Au, acima de 4,5 ppb, com valores de até 347 ppb, situadas nas bordas do platô, onde afloram colúvios e crostas lateríticas. A investigação direta da principal anomalia, através de trincheiras e sondagens rotativas, revelou mineralizações auríferas associadas às crostas lateríticas e veios de quartzo.

No segundo semestre de 1997 a CVRD retomou as pesquisas no Alvo, com o objetivo de ampliar as reservas de minério aurífero oxidado para beneficiá-lo na planta da Mina do Igarapé Bahia. Uma campanha de sondagens por circulação reversa mostrou a

potencialidade do Alvo para reservas de minério de ouro no horizonte oxidado, associados a *gossans*, veios de quartzo e crosta laterítica (pisolítica), com possibilidade de extensão em profundidade. Entretanto, mesmo após as sondagens, desconhecia-se o controle da zona mineralizada, a fonte primária do ouro laterítico e os sulfetos responsáveis pela formação dos *gossans*.

Os modelos dos depósitos de cobre e ouro da Província são caracterizados pela presença de *gossans* sobre corpos sulfetados, principalmente maciços, com desenvolvimento de carapaça laterítica e crosta pisolítica, além de uma espessa cobertura de latossolo empobrecido em metais. No perfil de intemperismo do Platô Breves, ocorre também uma espessa cobertura de latossolo, que grada em espessura na direção da borda, onde afloram crostas lateríticas compactas e/ou friáveis, estas últimas constituindo as zonas de colúvio. Abaixo da crosta pisolítica ocorre um pacote de saprólito ferrífero com *boxworks*, sugerindo a presença de sulfetos disseminados e *gossans* associados aos veios de quartzo, frequentemente mineralizados em ouro.

A mineralização cupro-aurífera pode ser enquadrada no modelo de depósitos de Au relacionado à intrusões, em correspondência à províncias de W e Sn, o qual envolve uma associação de Au, Cu, Ag, Sn, W, Mo e Bi, vinculada à intensa atividade metassomática e hidrotermal gerada pela intrusão ígnea. A principal zona mineralizada ocorre em um *greisen* relacionado ao ápice de uma intrusão granítica alcalina peraluminosa que passa, na base, à uma rocha subvulcânica de composição riolítica, geneticamente relacionada à intrusão granítica, encaixada em metassedimentos laminados de baixo grau (metarenitos, metasiltitos e metargilitos). A mineralogia sulfetada é representada por calcopirita, pirita, arsenopirita, pirrotita, molibdenita e feberita, que ocorrem disseminados e preenchendo fraturas em padrão *stockwork*. A mineralização pode também ocorrer nas encaixantes metassomatizadas, próxima à intrusões, em veios e/ou disseminadas, no primeiro caso na forma *stratabound*. O contexto estrutural e tectônico é representado pela zona de cisalhamento transcorrente que envolve a falha de Carajás e *splays*, de direção geral WNW-ESSE, constituindo um padrão em Z. A direção predominante do sistema de fratura que aloja a mineralização é representada por um par conjugado N45E-N15W. A intrusão granítica está orientada segundo NNE e é truncada por sistemas de fraturas em *stockwork*. Também ocorrem sistemas de falhas normais de direção predominantes N-S, formadas em evento tardio, com magmatismo associado (diques de gabro granofírico).

## Polarização Induzida Espectral

### Resultados Obtidos

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 1 a 8, e foram derivados de duas linhas de SIP (LT 200S e LT 300S), nas quais foi empregado o arranjo dipolo-dipolo com  $a = 80\text{m}$  e seis níveis de investigação. As profundidades adotadas para os mencionados níveis, em função do espaçamento utilizado, foram aquelas intermediárias entre as máximas e as mínimas sugeridas por Edwards (1977).

Todos os dados foram processados no módulo IP da *Geosoft OASIS Montajã* (5.06) e os resultados das inversões da resistividade e da cargabilidade global aparentes (cálculos dos modelos de profundidade), foram obtidos através do pacote *Zonge 2D Inversion for Interactivã IP*, da *Interpex/Geosoft*.

Como observa-se nas seções geofísicas, o comportamento da cargabilidade (mV/V), da resistividade ( $\text{Ohm}\cdot\text{m}$ ) e da constante de tempo ( $\tau$  em s), permitem distinguir três tratos, assim descritos: 1) extremos W e E, caracterizados por altos valores de cargabilidade aparente e de  $\tau$  e baixas resistividades; 2) segmento central (700W a 1000E), individualizado por índices baixos das duas primeiras variáveis e altos da última; 3) zona mineralizada (centrada na estação 400W), incluída no segmento anterior e identificada por grandezas intermediárias dos citados parâmetros, como pode-se observar na Tabela 1, a qual também exibe os teores de Au e Cu.

	Trato 1	Trato 2	Minério
Au (g/t)	-----	-----	1,59
Cu (%)	-----	-----	1,25
Cargabilidade	45	15	30
Resistividade	500	8000	1500
Tau ( )	25,0	0,2	2,7

Tabela 1 – Parâmetros geofísicos típicos de SIP e os teores médios do minério.

Os parâmetros geofísicos relacionados aos extremos das seções (trato 1), refletem litologias condutivas compostas por metassedimentos laminados ricos em manganês e grafita. O trato 2, encoberto por solos e crostas lateríticas, denotado pelo platô, é caracterizado por uma assinatura de SIP distinta, tanto dos metassedimentos quanto do minério. Já o trato 3 reflete a zona mineralizada, a qual foi identificada por diversos furos de sonda (figuras 3 e 7), composta por *greisens* com sulfetos disseminados, justificando os valores espectrais (Tabela 1).

Os modelos das figuras 1, 2, 5 e 6, obtidos por inversão das cargabilidades e das resistividades aparentes, mostram com clareza a localização do

corpo subvertical e do *front* mineralizado, relacionado à intrusão da cúpula granítica, em contraste com a disposição regional horizontalizada dos metassedimentos da Formação Águas Claras.

### Conclusões

A aplicação de SIP na descoberta do depósito Breves mostrou que o método é eficiente na discriminação de anomalias de IP, sobretudo através do parâmetro espectral da constante de tempo ( $\tau$ ), relacionado à granulometria dos minerais polarizáveis. Assim, altos valores de cargabilidade e de  $\tau$  estão vinculados ao efeito de polarização de membrana, gerado pela presença de rochas metassedimentares ricas em argilo-minerais, com manganês e grafita, enquanto as concentrações de sulfetos disseminados estão associados à índices intermediários daquelas variáveis. Por fim, os modelos derivados da aplicação de técnicas de inversão dos dados de cargabilidade e resistividade aparentes, tiveram papel importante no posicionamento dos corpos mineralizados e na consequente otimização da locação das sondagens.

### Referências Bibliográficas

- Dias, C.A. 1972. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 77 (26):4945-4956.
- Docegeo. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Anexo aos *Anais*, p.11-56.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, v.42, p. 1020-1036.
- Johnson, I.M. 1990. Spectral IP parameters from time-domain measurements, p. -78. In: *Induced Polarization – Applications and Case Histories*, Society of Exploration Geophysicists, SEG.
- Pelton, W.H. *et al.* 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, v. 43, p. 588-609.
- Sampaio, E.S. *et al.* 1993. Polarização Induzida Espectral em Santa Luz - Ba. 3º Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGf, RJ, v.I, p.503-508.

**Agradecimentos** Os autores agradecem ao CNPq/PADCT, Contrato N° 62.0155/97-3, o apoio para a realização desta pesquisa; à CVRD pela liberação dos dados e à Geoprospec pelo apoio financeiro.

## Polarização Induzida Espectral

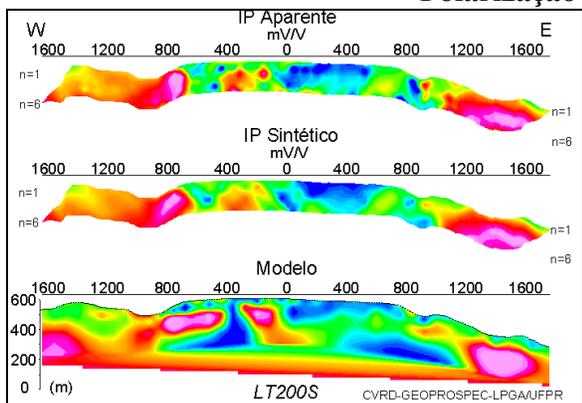


Figura 1 – Pseudo-seções de cargabilidade e o modelo de profundidade obtido por inversão.

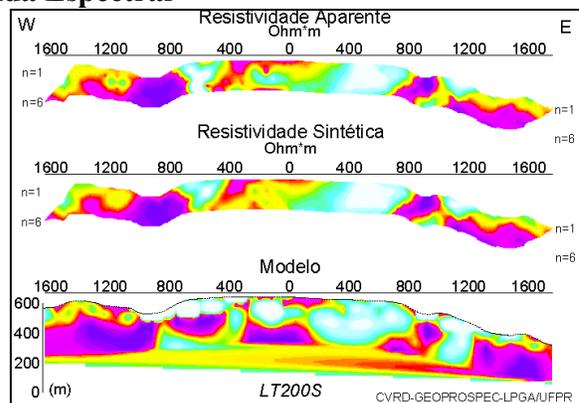


Figura 2 – Pseudo-seções de resistividade e o modelo de profundidade obtido por inversão.

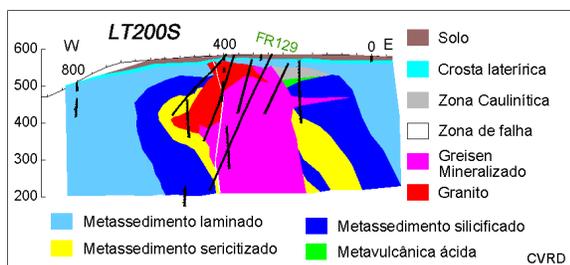


Figura 3 – Perfil geológico indicando a zona mineralizada e suas encaixantes.

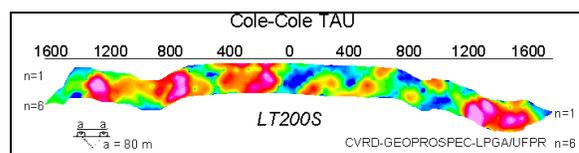


Figura 4 – Pseudo-seção da constante de tempo ( $t$ ).

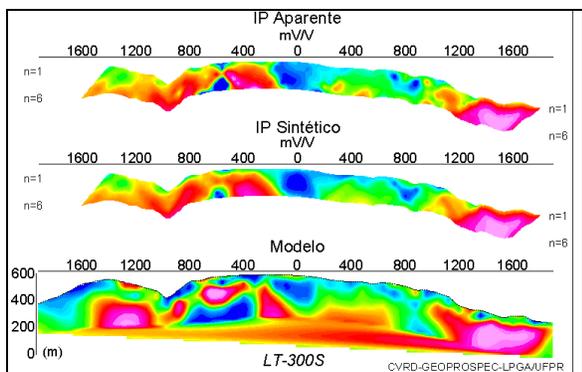


Figura 5 - Pseudo-seções de cargabilidade e o modelo de profundidade obtido por inversão.

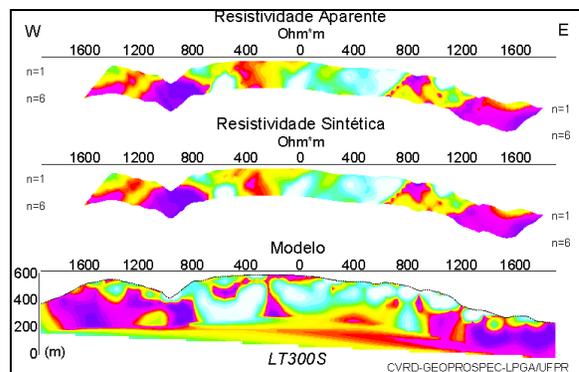


Figura 6 - Pseudo-seções de resistividade e o modelo de profundidade obtido por inversão.

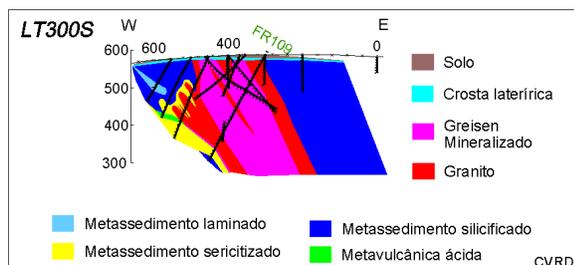


Figura 7 – Perfil geológico indicando a zona mineralizada e suas encaixantes.

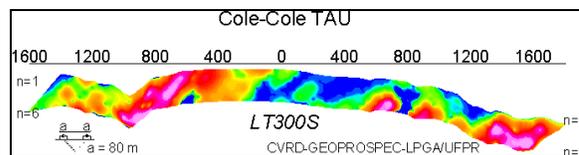


Figura 8 – Pseudo-seção da constante de tempo ( $t$ ).



## Aspectos da resposta magnética das mineralizações auríferas da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil

Silvia Beatriz Alves Rolim, IG-UFRGS/IG-UNICAMP, Brasil, [silvia.rolim@ufrgs.br](mailto:silvia.rolim@ufrgs.br)  
Carlos Alberto Mendonça, IAG-USP, Brasil, [mendonca@iag.usp.br](mailto:mendonca@iag.usp.br)

### Resumo

The high-resolution data of Rio das Velhas Project has been at the origin of detailed researches in view to characterize the geophysical signature of the Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrangle) gold deposits. This fact is outlined in this paper where a reverse pattern of magnetic anomalies suggests a specific geological and structural environment with gold concentrations.

### Introdução

O Quadrilátero Ferrífero (QF), uma das principais províncias auríferas do mundo, vem sendo palco de diversas campanhas de estudo há mais de um século, na tentativa de conhecer seu potencial metalogenético, assim como sua complexa evolução tectônica. Uma dessas campanhas consta do levantamento aerogeofísico de alta resolução do Projeto Rio das Velhas (PRV), cujo objetivo foi realizar estudos de detalhe como auxílio à definição de controles para as mineralizações auríferas em terrenos do tipo *greenstone belt* e à pesquisa de novos prospectos (Brasil, 1993). Os resultados preliminares do PRV apresentados por CPRM (1996) propiciaram investigações geofísicas com o auxílio de perfis terrestres (Vieira, 1997) e de avançadas técnicas de integração de dados (Tavares, 1997; Silva, 1999; Rolim, 2001). Até o momento, pode-se dizer que os objetivos do PRV não foram totalmente atingidos, pois é possível identificar correlações entre feições geofísicas e ambientes de mineralização que ainda não foram reconhecidas. Este trabalho mostra uma destas assinaturas, identificada em associação com um trecho da Zona de Cisalhamento São Vicente (ZCSV), ao longo do qual ocorre uma centena de depósitos auríferos.

### Objetivos

Um aspecto relevante na exploração de depósitos auríferos é a investigação de sub-ambientes favoráveis à mineralização (litologias específicas, horizontes estratigráficos, estruturas) e suas possíveis relações com padrões de respostas magnéticas. Esse artigo apresenta um caso onde um padrão reverso de anomalia magnética destaca um ambiente geológico-estrutural específico com concentrações de ouro associadas.

### Contexto Geológico

O QF posiciona-se no extremo sul do Cráton São Francisco, e é caracterizado por terrenos granito-

gnáissicos (TGGs) arqueanos e paleoproterozóicos; uma seqüência vulcanossedimentar arqueana do tipo *greenstone belt* (Supergrupo Rio das Velhas - SGRV) e seqüências metassedimentares supracrustais proterozóicas. O SGRV é representado, na base, pelo Grupo Nova Lima (GNL), uma sucessão metavulcanossedimentar polideformada em condições metamórficas de fácies anfíbolito, com retrometamorfismo em fácies xisto-verde (Ladeira 1980). No topo encontram-se as rochas metassedimentares predominantemente quartzíticas do Grupo Maquiné (GM) (Dorr, 1969). Os TGGs são compostos por gnaisses bandados de composição tonalítica a granodiorítica, mostrando graus variados de migmatização. A Figura 1 apresenta as unidades da área investigada.

### Características das Mineralizações Auríferas

O QF consiste numa das principais províncias auríferas do tipo *BIF-hosted* no mundo, onde a maioria dos depósitos primários encontra-se associada às unidades do GNL. A mineralização possui uma gênese de complexo entendimento, iniciada no Arqueano por uma interação de processos sedimentares e vulcano-exalativos que concentraram o ouro em corpos sulfetados e veios de quartzo hospedados em rochas metavulcânicas e metassedimentares alteradas hidrotermalmente. A idade da mineralização e os estudos sobre suas relações com a evolução tectônica não são satisfatoriamente conhecidos.

Os depósitos de ouro investigados ocorrem associados à ZCSV de direção N50°W, distribuídos ao longo de seu *trend* principal (Lineamento São Vicente - LSV). Cortando toda a extensão da área, a ZCSV possui cinemática direcional, sinistral, representando uma importante descontinuidade crustal que acompanha a direção geral do Arqueamento Rio das Velhas (Dorr, 1969). Os depósitos auríferos foram descobertos e lavrados durante os séculos XVIII e XIX e, atualmente, correspondem a uma centena de escavações superficiais, a maioria abandonadas ou desativadas. Suas dimensões variam entre 100 a 1200 m de comprimento e 100 m de extensão lateral. Geralmente, os corpos de minério ocorrem nas rochas metassedimentares, hospedados nos sulfetos disseminados em veios de quartzo, envoltos por zonas de alteração hidrotermal. Além desses, existem depósitos na porção W da área, distribuídos em zonas sulfetadas associadas a formações ferríferas bandadas (ffbs) em rochas metavulcânicas máficas e félsicas.

## Expressão Magnética da ZCSV

### Dados Aerogeofísicos

Os dados magnetométricos do PRV foram registrados em linhas de vôo espaçadas em 250 m. A aeronave utilizada, um helicóptero Bell-212, manteve uma altura média de vôo de 60 metros (altura do sensor magnético: 45 m) e velocidade entre 70 a 110 km/h. O magnetômetro utilizado apresentou uma sensibilidade de 0,01 nT no registro de 5 leituras a cada segundo. O levantamento foi subdividido em 4 blocos, dos quais são interpretados nesse trabalho os blocos II e III, ambos com linhas de vôo na direção N40°E. Maiores detalhes são encontrados em Brasil (1993).

### Processamento dos Dados Aeromagnéticos

Inicialmente, os dados magnéticos brutos foram corrigidos do campo geomagnético regional, por subtração dos valores previstos pelo modelo IGRF. Os dados anômalos, assim obtidos, foram interpolados em malha regular com célula de 30 m usando o algoritmo da krigagem universal com variograma ajustado para modelo de distribuição esférica (Chiles & Guillen, 1984). Os dados em malha foram, posteriormente, micronivelados e georreferenciados nas bases geológica e topográfica digitais e utilizados na produção dos mapas apresentados a seguir. Estes mapas foram interpretados de forma semi-quantitativa usando como analogia diversos testes de simulação (não apresentados neste resumo) aplicados em anomalias sintéticas semelhantes às existentes na área estudada (Rolim, 2001).

### Mapa da Anomalia Magnética

A Figura 2 mostra o mapa da anomalia magnética (campo total) que, basicamente, se caracteriza pela presença de efeitos correspondentes a fontes mais superficiais (comprimento de onda curto) sobrepostos a efeitos causados por fontes mais profundas, cuja expressão é parcialmente mostrada na janela de dados. As anomalias truncadas são caracterizadas por um só sinal (por exemplo: os valores positivos na porção NW do mapa) ao contrário do padrão dipolar normal, com valores negativo ao sul e positivo ao norte da fonte, correspondentes a corpos com magnetização induzida apenas. A presença de anomalias monopolares sugere: a) a existência de fontes com anomalias de padrão normal externas à janela de dados ou b) fontes com magnetização total com forte remanescência situadas no interior da janela do levantamento. Esta indefinição impede a caracterização das fontes profundas e necessariamente exige a incorporação de dados regionais para que seja suplantada (Rolim, 2001).

As fontes rasas, entretanto, podem ser plenamente caracterizadas em meio ao relevo magnético perturbado, no qual se percebe um lineamento N50°W

coincidente com a ZCSV, que inflete 60°-70° para W na parte N (comparar figuras 1 e 2). Observações de campo nas proximidades das minas São Vicente e Paciência confirmam uma distribuição de magnetita bem formada e achatada segundo o plano de foliação N50°W na porção SE desta zona. Nesta mesma direção observam-se veios de quartzo preenchendo fraturas de extensão de direção NE-SW, além de raras e pequenas lentes (3 cm de largura) de ffb's intercaladas na foliação e imperceptíveis ao levantamento aerogeofísico. Conforme se observa na Figura 2, a parte S da ZCSV associa-se a uma anomalia magnética com polaridade oposta ao padrão normal, já que apresenta valores positivo ao sul e negativo ao norte desse trecho. Na parte N do lineamento a polaridade da anomalia não pode ser perfeitamente identificada devido ao efeito de sobreposição de anomalias regionais que ocorre na porção NW do mapa.

### Mapa de Gradiente Vertical

Para melhor caracterizar a anomalia magnética associada à ZCSV aplicou-se o filtro de derivada vertical nos dados de anomalia magnética (Figura 2), obtendo-se o mapa de gradiente vertical (GV) (Figura 3). Este mapa torna mais evidente a reversão de polaridade da anomalia magnética sobre a porção S da ZCSV (destacada por uma seta na Figura 3), ao contrário da porção N onde predominam anomalias com padrão normal. A reversão de polaridade na parte S sugere que a ZCSV esteja alojando materiais magnéticos com composição e/ou idade distintas, provavelmente originados em eventos geológicos específicos. Considerando o expressivo número de ocorrências auríferas na parte sul do LSV, com teores em ouro de até 15 g/t, pode-se cogitar que o processo de mineralização guarde uma associação com o evento específico que causou o alojamento da formação magnética com atributos de remanescência ao longo da zona de falha. Esta hipótese, sugerida a partir da assinatura da anomalia magnética, deve ser considerada, tanto com fins prospectivos quanto em estudos tectônicos do QF ou referentes à gênese das mineralizações.

### Mapa de Anomalias Reduzidas ao Pólo

A Figura 4 mostra o mapa da anomalia magnética reduzida ao pólo obtido a partir do mapa da Figura 2. Observa-se que o processo de redução ao pólo (RP) distorce a anomalia truncada presente na porção W da área. Além disso, ruídos são realçados na direção do norte magnético, principalmente nos domínios da anomalia truncada, comprometendo ainda mais a caracterização das anomalias de fonte rasa associadas às ffb's e às unidades máfica-ultramáficas (cb e of), dificultando a interpretação.

## Expressão Magnética da ZCSV

### Mapa de Amplitude do Sinal Analítico

Na Figura 5 observa-se que o mapa amplitude do sinal analítico (SA) delimita o contato entre os domínios essencialmente magnéticos característicos das unidades inferior e média do GNL (D1) e os domínios não magnéticos representados pelas rochas essencialmente quartzíticas do GM (D2). Os domínios D3 e D4 estão associados ao Complexo Metamórfico Bação e às unidades magnéticas do SGM, respectivamente. As diversas falhas presentes na ZCSV são preenchidas de forma descontínua por material magnético, possivelmente, ao longo das superfícies de empurrão. Os maiores valores da amplitude do SA na porção S da ZCSV sugerem que essa parte do LSV, além de apresentar remanescência, possui também maior intensidade de magnetização. Observam-se diversas falhas de empurrão na porção NE da área também associadas a anomalias magnéticas e que podem ser portadoras de materiais ferromagnéticos. Nenhuma delas, entretanto, apresenta padrão reverso tão marcante como o verificado na porção S da ZCSV.

### Conclusões

A presença de anomalias truncadas em levantamentos de alta resolução, tal como ocorrem no PRV, impede a caracterização das fontes profundas e dificulta a interpretação das fontes rasas devido ao efeito de sobreposição das anomalias. Da mesma forma, o efeito de truncamento compromete a transformação de RP que, nestas condições, gera feições sem nenhuma correspondência com a realidade. O problema da interferência de anomalias pode ser contornado utilizando na interpretação informações provenientes da aplicação de derivadas tais como, os mapas de GV e de amplitude do SA. Na região estudada, o mapa de GV foi particularmente útil na caracterização (e delimitação) de uma porção da ZCSV, apresentando anomalia compatível a fontes com magnetização total de forte remanescência, nesse caso, associada a concentrações de ouro.

### Referências

- Brasil. Ministério de Minas e Energia. DNPM, 1993. Lev. aéreo, mag., gamaesp. e eletromag. Proj. Rio das Velhas. Rel. Final. RJ, PROSPEC, DNPM.
- CPRM 1996. Geologia. Lev. aerogeofísicos. Projeto Rio Das Velhas. Mapa Geológico Integrado. Escala 1:100000. Texto Explicativo. CPRM, BH, MG.
- Ladeira, E.A. 1980. Metallogenesis of gold at the Morro Velho Mine, and in Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Univ. Western Ontario. PhD Thesis, 272p.
- Noce, C.M 1995. Geocronologia dos eventos magmá-

- ticos, sedimentares e metamórficos na região do QF, MG. SP, 128p.(Tese de Doutorado, IG, USP).
- Rolim, S.B.A. 2001. Resposta geofísica dos depósitos de ouro da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero, MG. (Tese de Doutorado, IG, UNICAMP).
- Silva, A.M. 1999. Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para a exploração mineral aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, QF.
- Tavares, 1997. Identificação de áreas potencialmente favoráveis à mineralização aurífera a partir de dados estruturais e aerogeofísicos aplicados a terrenos do tipo "greenstone belt": o caso da Folha Caeté, QF, MG. (Diss. de Mestrado, UFOP, MG).
- Vieira, P. 1997. Caracterização geológico-geofísica das mineralizações auríferas de Greenstone Belt Rio das Velhas. CIBSG, V. SP, p.625-618.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro (bolsa de doutoramento) e à CPRM pela cessão dos dados aerogeofísicos do Projeto Rio das Velhas.

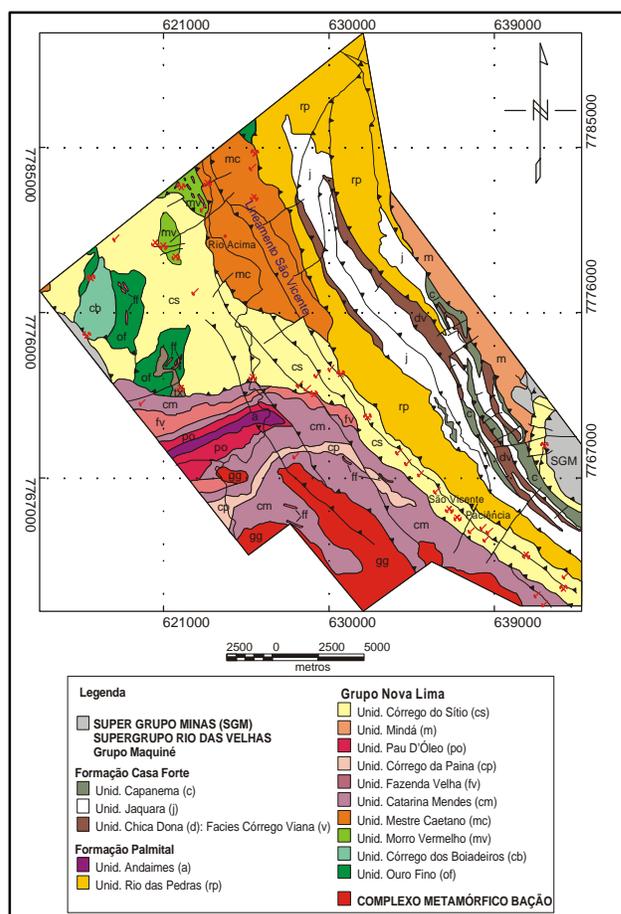


Figura 1 - Mapa geológico da área de estudo (fonte: CPRM 1996).

## Expressão Magnética da ZCSV

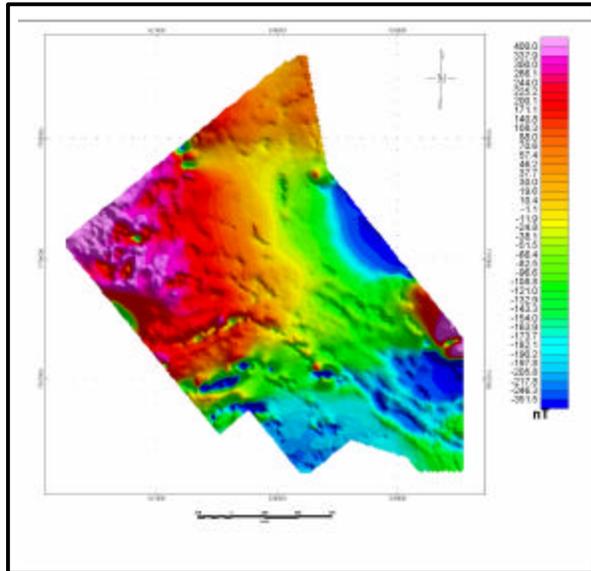


Figura 2 - Mapa de intensidade do campo magnético total.

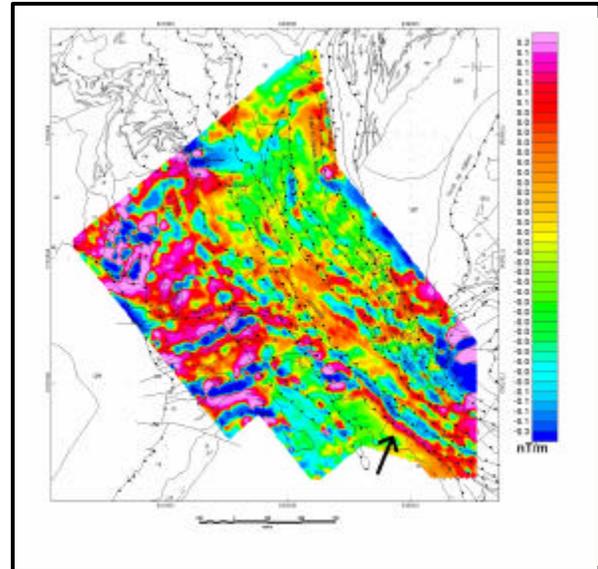


Figura 3 - Mapa de gradiente vertical.

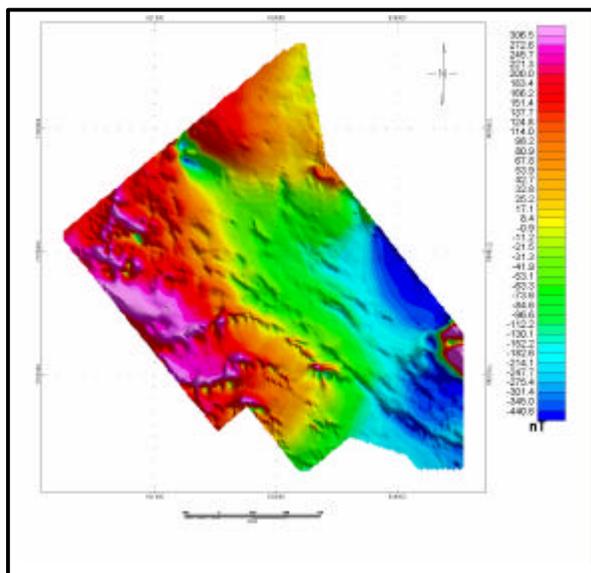


Figura 4 - Mapa de intensidade do campo magnético reduzido ao pólo.

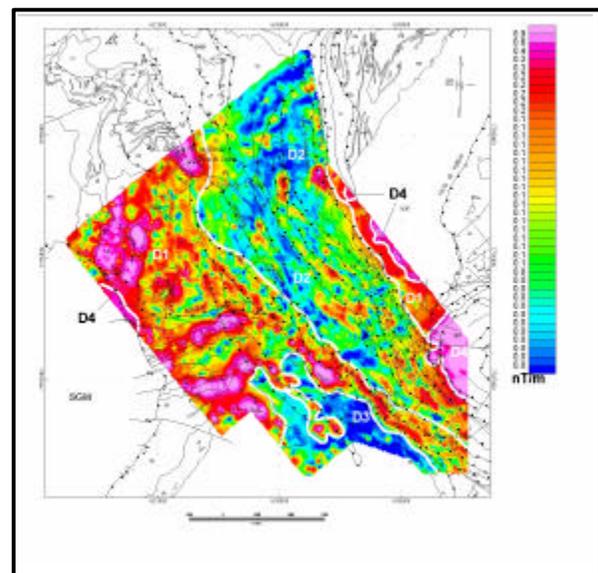


Figura 5 - Mapa amplitude do sinal analítico.

## Assinaturas Aerogeofísicas e as Mineralizações de Ouro na Província Mineral do Tapajós

Maria Laura Vereza de Azevedo, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, [mlva@cprm.gov.br](mailto:mlva@cprm.gov.br)

Maria Glícia Nóbrega Coutinho, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, [mgc@cprm.gov.br](mailto:mgc@cprm.gov.br)

Roberto Gusmão de Oliveira, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, [rgusmao@hotmail.com.br](mailto:rgusmao@hotmail.com.br)

### Abstract

This work is part of the Tapajós Mineral Province Project – Geology and Metallogeny of the Primary Gold Mineralizations (Coutinho *et al.*, 2000). A correlation was done between the gold mineralizations in the area and the aerogeophysical information, with the objective of providing elements for elaborating a model for the structural control of the gold mineralizations.

### Introdução

A cobertura aerogeofísica da Província Mineral do Tapajós (figura 1) é o resultado da integração dos dados obtidos dos projetos:

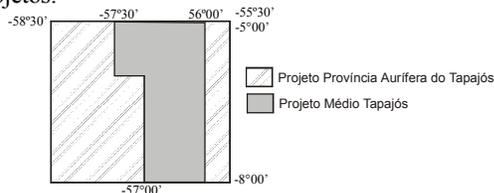


Figura 1. Cobertura aerogeofísica da Província Mineral do Tapajós.

- Médio Tapajós, com altura e espaçamento entre as linhas de vôo de 150m e 2 km, respectivamente.
- Província Aurífera do Tapajós, com altura e espaçamento entre as linhas de vôo de 100m e 1km, respectivamente e *grid* final de 250m x 250m. Vale ressaltar que esse projeto foi o primeiro realizado pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) com os dados finais entregues em concentração de elementos: K (%), eTh e eU (ppm), contagem total ( $\mu\text{R/h}$ ) e campo magnético total reduzido do IGRF.

### Processamento dos Dados

Os dados levantados pelos dois projetos mencionados, com espaçamentos distintos entre as linhas de vôo, apresentam grau de detalhamento distinto, o que deve ser levado em conta na sua interpretação. Para homogeneizá-los usou-se o programa Oasis Montaj, da empresa canadense Geosoft.

Para o projeto Médio Tapajós, utilizaram-se os grids radiométricos de 500m do projeto BARMP (*Brazil Airborne Radiometric Mapping Project*), feito em conjunto com a empresa canadense PGW (Paterson, Grant and Watson), onde os dados foram backcalibrados, obtendo-se valores em concentração de elementos. Foi feita uma reamostragem dos dados, com a geração de células 250m x 250m. Com relação aos dados magnetométricos, foi obtido um *grid* de 250m do campo magnético total reduzido do IGRF a partir do processamento do arquivo XYZ do projeto Médio Tapajós.

A seguir elaborou-se um nivelamento com os grids finais do Projeto Província Aurífera do Tapajós. O ajuste final resultou na junção dos dados dos dois projetos num único arquivo digital, com grids de concentração de K (%), eTh e

eU (ppm), contagem total ( $\mu\text{R/h}$ ) e campo magnético total reduzido do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) em nT.

### Geologia da Área

O Projeto Província Aurífera do Tapajós - PROMIN localiza-se no estado do Pará e parte do Amazonas (figura 2).



Figura 2. Mapa de localização da área do Projeto Província Aurífera do Tapajós - PROMIN, Estado do Pará e parte do Amazonas, Brasil.

O mapa geológico simplificado (figura 3) foi obtido a partir da Carta Integrada 1:500.000 (Klein *et al.*, 2000). O embasamento consiste em metassedimentos do Grupo Jacareacanga, gnaisses do Complexo Cuiú-Cuiú e granitóides da Suíte Intrusiva Creporizão. As rochas do embasamento foram intrudidas por granitóides das Suítes Intrusivas Parauari e Maloquinha. Após o evento Maloquinha, ocorreu o vulcanismo félsico (Grupo Iriri), consistindo de vulcânicas félsicas e piroclásticas. Esse vulcanismo e rochas plutônicas associadas (Suíte Intrusiva Maloquinha) formam um sistema vulcano-plutônico com expressividade regional no Cráton Amazônico (Supergrupo Uatumã). A seguir, a província foi submetida ao *emplacement* de granitóides subalcalinos a peralcalinos, pós Maloquinha; magmatismo básico alcalino, tipo Crepori, e basaltos alcalinos a toleíticos, tipo Cachoeira Seca. E, completando a evolução tectono-geológica da província, durante o Mesozóico ocorreu um expressivo magmatismo básico, sob a forma de enxames de diques doleríticos, que ocorreu em todo o Cráton Amazônico.

Para compreensão do quadro geológico a nível regional foram selecionados 20 garimpos (áreas de prospectos) representativos dos diferentes condicionamentos tectono-geológicos, também plotados no mapa geológico simplificado. A Província Mineral do Tapajós caracterizou-se por uma expressiva produção de ouro aluvionar, mas após 1996 houve a sua exaustão. No entanto, depósitos de ouro primário estão amplamente distribuídos e poderão ter significado econômico (Robert, 1996), embora não estejam sendo minerados até o presente.

As mineralizações ocorrem numa gama heterogênea de rochas, não tendo sido reconhecida uma unidade litológica preferencial como rocha encaixante da mineralização. Os registros estruturais mais expressivos da área, em escala regional, são megalineamentos com direção predominantemente NW-SE e constituem o Megassistema de Falhas Transcorrentes do Tapajós. Nesse domínio foram cadastradas as maiores concentrações de mineralizações auríferas da província.

### Interpretação dos Dados

#### a) Dados aeromagnetométricos

Com a finalidade de se obter uma melhor visualização das estruturas geológicas da área, foram elaborados mapas de relevo sombreado ( $I=45^\circ$ ,  $D=45^\circ$ ) do campo magnético total reduzido do IGRF, colorido e em tons de cinza (figuras 4 e 5). Os lineamentos magnéticos apresentam uma boa correlação com as principais zonas de cisalhamento mapeadas na província.

As 20 áreas mineralizadas em ouro (áreas de estudos de prospectos) plotadas sobre os mapas aerogeofísicos permitem reconhecer *trends* aeromagnéticos que correlacionam-se com as mineralizações de ouro. A partir dessa integração de dados, são sugeridos os seguintes *trends* auríferos:

1) Áreas mineralizadas localizadas em gabros da Suíte Intrusiva Ingarana, cujo *emplacement* é controlado pelo sistema de fraturas extensionais orientadas segundo a direção E-W (áreas 1 e 6).

2) Áreas mineralizadas localizadas em zonas de interseção de falhas e de contatos de unidades litológicas distintas. Essas áreas caracterizam-se por reativação tectônica, conforme evidências de campo (áreas 12 e 14).

3) Áreas mineralizadas localizadas ao longo do *trend* NW-SE de expressão regional e representatividade marcante nos mapas de sombreamento magnético. Este *trend*, estruturalmente, corresponde a uma zona de transcorrência sinistral (Megassistema de Falhas Transcorrentes do Tapajós). Nesta categoria estão as áreas 20, 9, 4, 17, 2, 7 e 13, que definem um *trend* NW-SE mineralizado.

4, 5 e 6) Áreas mineralizadas posicionadas segundo *trends* NW-SE de expressão regional, paralelo ao definido em (iii), com boa representatividade no mapa magnético sombreado. Estruturalmente, esses *trends* correspondem a zonas de transcorrência sinistral. Nesta categoria estão as áreas 15 e 19, 10 e 18, 3 e 5, que definem três *trends* auríferos.

#### b) Dados aerogamaespectrométricos

O mapa de diagrama ternário (figura 6) foi elaborado usando-se a composição RGB (K, Th, U). Sua interpretação trouxe resultados importantes na correlação com unidades e estruturas geológicas.

O grande batólito localizado no centro da folha, alongado na direção NW-SE, apresenta igual quantidade dos elementos U, Th e K (cores esbranquiçadas na figura). Consiste de intrusões de granitóides das suítes intrusivas Parauari e

Maloquinha. Como essas duas suítes possuem o mesmo magmatismo calcioalcalino, não é possível distingui-las radiometricamente.

A lateritização dos sedimentos da Bacia Amazonas e do Graben do Cachimbo contribuiu para o enriquecimento em urânio, o que é evidenciado pelos tons em azul.

O vulcanismo félsico, representado pelo Grupo Iriri, acha-se bem representado na porção leste da província, em tons de verde, evidenciando enriquecimento em tório.

O enriquecimento em K (tons em rosa) nas rochas xistificadas do Grupo Jacareacanga justifica a expectativa de uma origem ígnea para essas rochas, sugerida pelos estudos petroquímicos.

As suítes intrusivas Creporizão, Parauari e Maloquinha apresentam uma grande variedade composicional, o que se reflete na diversidade de assinaturas no mapa de diagrama ternário.

O sistema de falhamentos NW-SE dominante na área também se acha bem representado no mapa de diagrama ternário.

### Conclusões

Dados aerogeofísicos antigos (Projeto Médio Tapajós), combinados com projetos novos, de alta resolução (Projeto Província Aurífera do Tapajós), podem efetivamente trazer novas contribuições ao entendimento geológico e ao arcabouço tectono-estrutural de uma área.

As mineralizações de ouro na Província Mineral do Tapajós apresentam uma evidente associação ao Megassistema de Falhas Transcorrentes do Tapajós, de direção NW-SE. Nesse sentido, ficou demonstrada a correlação entre as assinaturas aerogeofísicas e as estruturas favoráveis à mineralização de ouro.

### Referências Bibliográficas

Brazil Airborne Radiometric Mapping Project. Technical Report and Survey Atlas. PGW/GSC/CPRM/, 1997. 30 p.

Projeto Médio Tapajós. Rio de Janeiro: CPRM/DNPM/LASA, 1987. Vol I. 67 p.

Projeto Aerogeofísico Província Aurífera do Tapajós. Rio de Janeiro: CPRM/LASA, 1998. Vol I. 33 p.

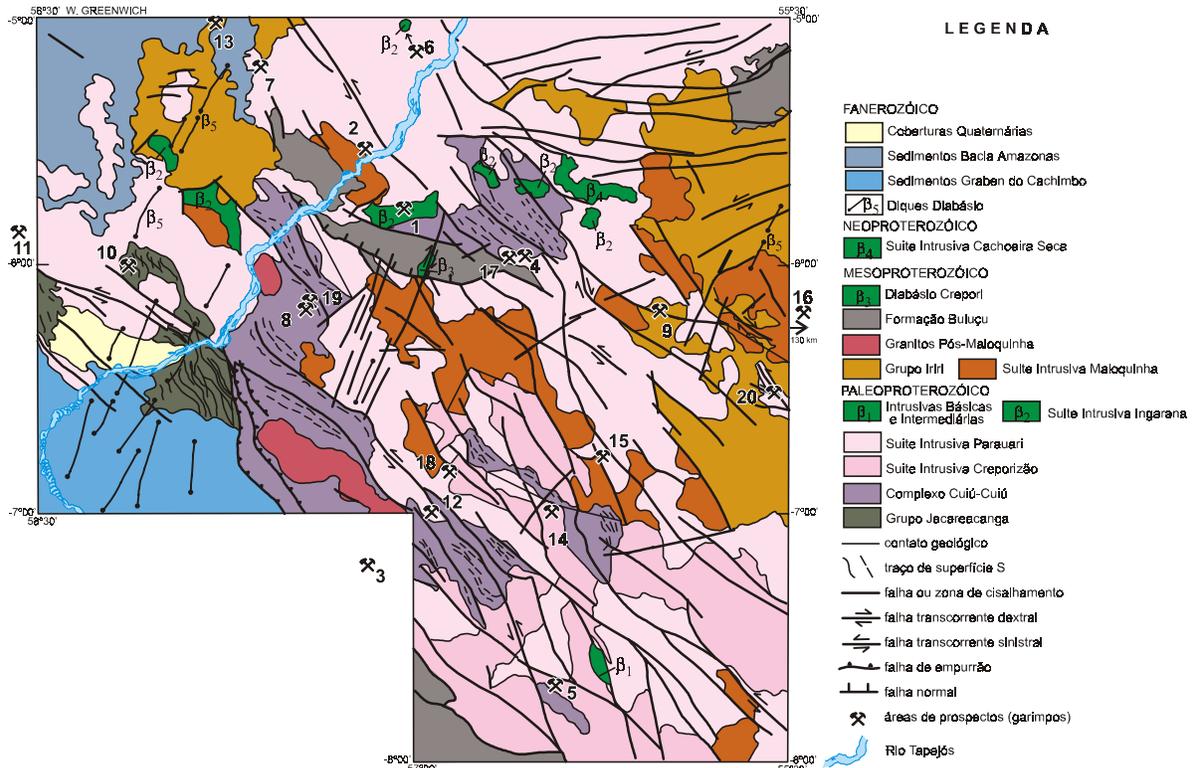
Robert, F. Tapajós Gold Project, Pará State, Brazil. Mission Report, CIDA Project 204/13886, Canadá-Brazil Cooperation Project for Sustainable Development in Mineral Sector, 1996. 35 p.

Klein, E. *et al.* PROMIN - Tapajós. Geologia e Recursos Minerais da Província Mineral do Tapajós. Estados do Pará e do Amazonas. Escala 1:500.000. Nota Explicativa. Belém: CPRM, 2000. 104 p.

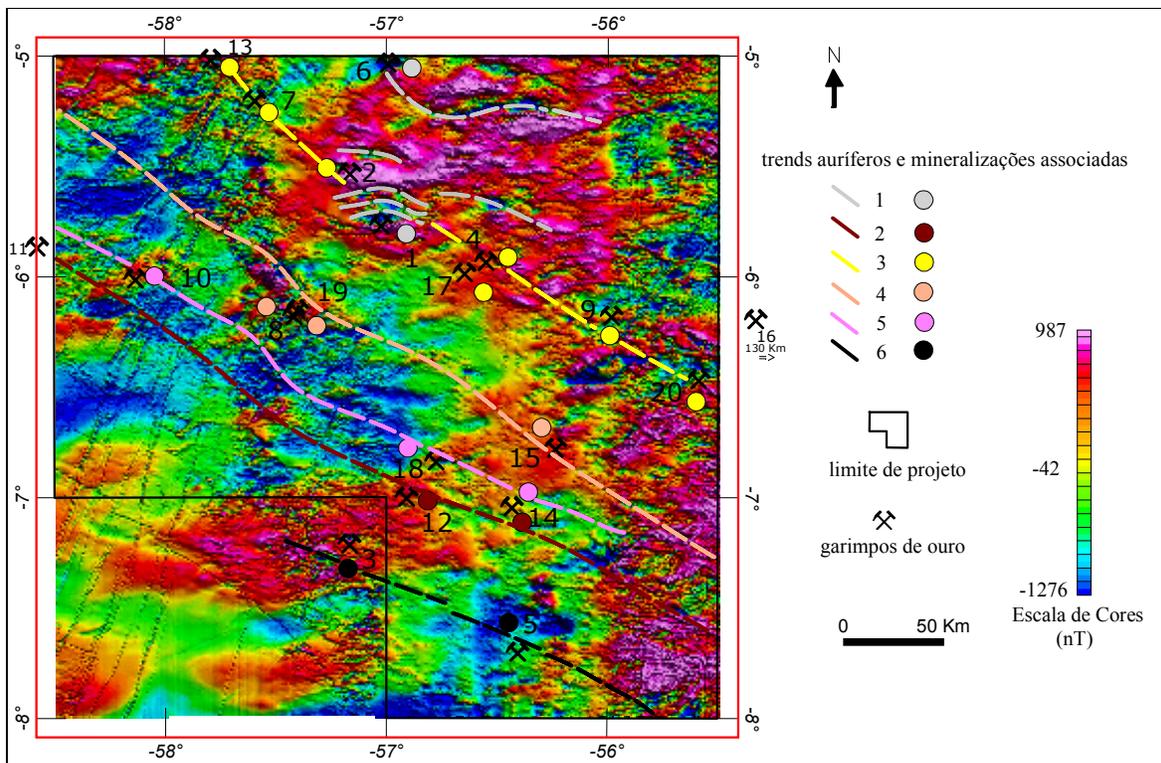
Coutinho, M. G. da N. *et al.* Projeto Província Aurífera do Tapajós: Geologia e Metalogenia das Mineralizações de Ouro Primário. Rio de Janeiro. CPRM, 2000. Vol I. (Relatório Inédito).

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CPRM - Serviço Geológico do Brasil pela oportunidade da realização desse trabalho.



**Figura 3.** Mapa geológico simplificado cobrindo a área de abrangência do Projeto Província Aurífera do Tapajós, Estado do Pará e parte do Amazonas, obtido a partir da Carta Integrada 1:500.000 (Klein *et al.*, 2000).



**Figura 4.** Mapa de relevo sombreado colorido do campo magnético anômalo,  $I = 45^\circ$  e  $D = 45^\circ$ .

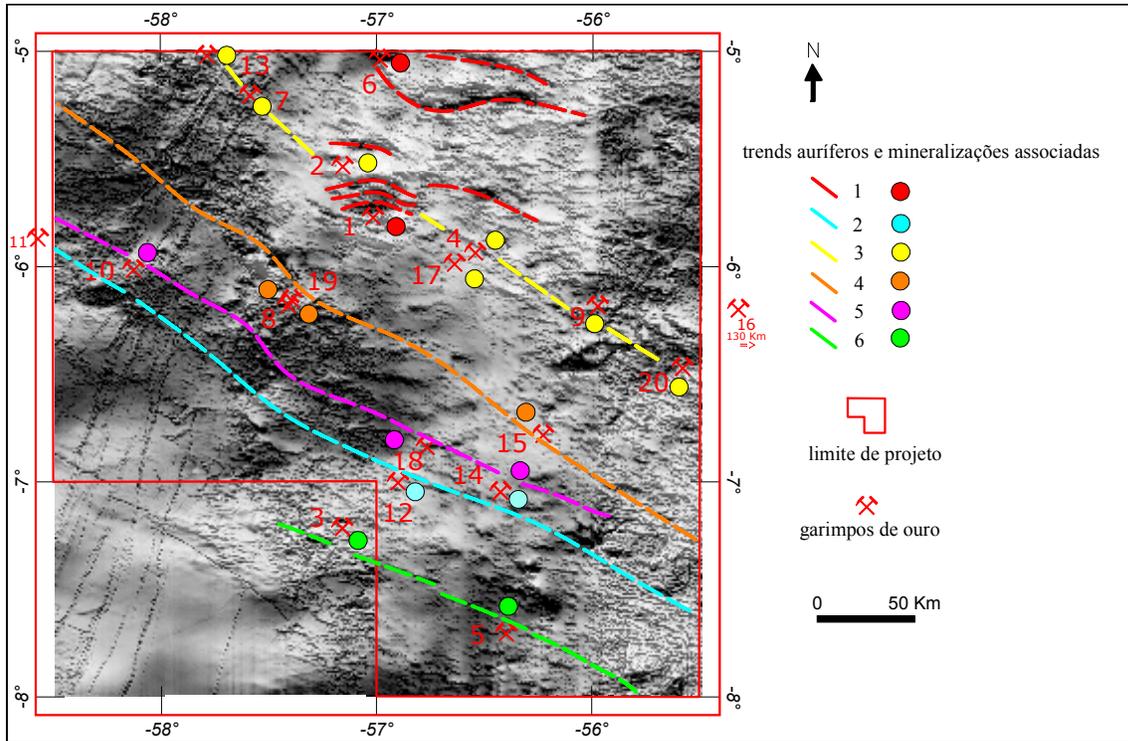


Figura 5. Mapa de relevo sombreado em tons de cinza do campo magnético anômalo,  $I = 45^\circ$  e  $D = 45^\circ$ .

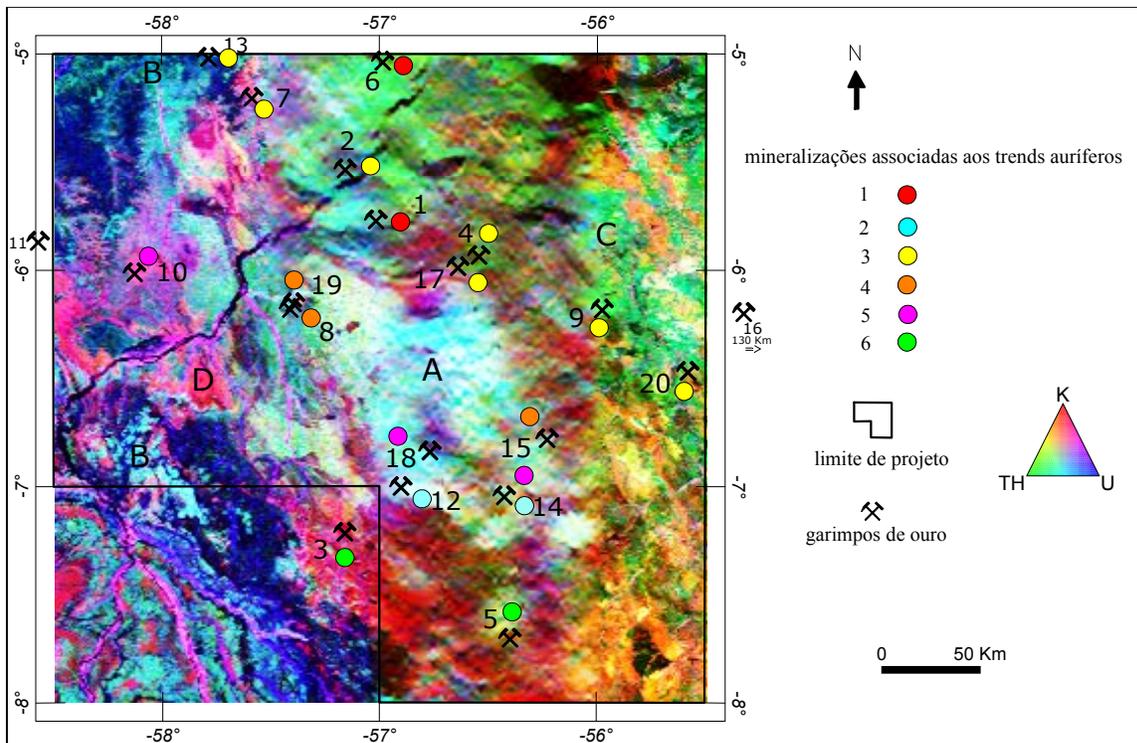


Figura 6. Mapa do diagrama ternário, Província Mineral do Tapajós. A) Suítes Intrusivas Parauari e Maloquinha; B) Sedimentos da Bacia Amazonas e Graben do Cachimbo; C) Grupo Iriri e D) Grupo Jacareacanga.



## Ensaio de Polarização Induzida Espectral (SIP) Aplicados à Exploração Mineral de Chumbo e Zinco no Alvo Paqueiro, Vale do Ribeira-PR

F. J. F. Ferreira <sup>(1)</sup>; R. Stevanato <sup>(1)</sup>; M. Forlin <sup>(1)</sup>; N. D. Franke <sup>(2)</sup>; S. N. Villanova <sup>(2)</sup>; L. Stasiak <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA/UFPR; <sup>(2)</sup> Gold Standard Minas S.A.; <sup>(3)</sup> Geoplanejamento Pesquisa Mineral e Geologia Ambiental Ltda.

### Abstract

This paper shows the results of the Spectral Induced Polarization (SIP) traverses run across Mobile Metal Ion (MMI) Pb-Zn-Cu-Cd geochemical soil anomalies at the Vale do Ribeira region (Paraná State). Inversion of the apparent chargeability defines strong polarized bodies that are coincident with most of the soil geochemistry anomalies. The time constant spectral parameter allow us to suppose that the high chargeability targets that were not related to soil geochemistry anomalies could represent other polarized minerals than sulfides.

### Introdução

O método da polarização induzida (*induced polarization - IP*) é freqüentemente empregado na exploração mineral, sobretudo na prospecção de metais base e de ouro, em fases avançadas da pesquisa, as quais, normalmente, orientam e precedem as campanhas de sondagem. Recentemente, a equipe do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada - LPGA/UFPR, juntamente com pesquisadores da Gold Standard Minas S.A., realizou ensaios de polarização induzida espectral (*spectral induced polarization - SIP*) com o objetivo de testar a performance do método e avaliar os resultados em correspondência à anomalias geoquímicas de Pb-Zn-Cu-Cd em solos, dosadas pelo método *mobile metal ion (mmi)*, no denominado Alvo Paqueiro, município de Adrianópolis, Vale do Ribeira-PR (Figura 1).

### O Método da Polarização Induzida Espectral

O método da polarização induzida espectral - SIP envolve uma série de técnicas vistas como complementares às da resistividade e cargabilidade dos tradicionais levantamentos de IP. Tal método pode adotar os modelos de impedância Cole-Cole (Cole & Cole 1941) ou o de Dias (1972) para estudar os efeitos da polarização induzida espectral nos domínios da freqüência (eg. Sampaio *et al.*, 1993) ou do tempo (eg. Johnson, 1990). A impedância complexa (função transferência) depende da resistividade -  $R_0$ ; da voltagem relativa residual registrada após a interrupção de um pulso muito longo (cargabilidade verdadeira -  $m$ ); da constante de tempo -  $t$  e do expoente -  $c$ , os quais descrevem as

formas das curvas de decaimento no domínio do tempo, ou o espectro de fase no domínio da freqüência. Pelton *et al.* (1978) sugeriram que a impedância complexa de uma fonte polarizável simples pode ser expressa como segue:

$$Z(\omega) = R_0 \{ 1 - m [ 1 - 1 / (1 + i\omega t)^c ] \}$$

onde:  $Z(\omega)$  = impedância complexa ( .m);  $R_0$  = resistividade ( .m);  $m$  = cargabilidade verdadeira (V/V);  $t$  = constante de tempo (s);  $\omega$  = freqüência angular (1/s);  $c$  = expoente e  $i = (-1)^{1/2}$ .

Para alvos convencionais de IP,  $t$  varia desde mili-segundos até índices superiores a 100 segundos e está relacionada com a granulometria (*grain size*) dos minerais polarizáveis. O expoente  $c$  varia, via de regra, entre 0.1 e 0.5 e constitui um parâmetro relacionado à uniformidade granulométrica dos alvos. O SIP é primeiramente utilizado para definir a "textura" da mineralização metálica em sub-superfície, relacionando-se à constante de tempo -  $t$  do efeito IP, medido com a granulometria da mineralização (Pelton *et al.*, 1978). Assim, em geral, a constante de tempo é pequena em mineralizações de granulação fina, verificando-se o contrário quando a mineralização é grossa, o que pode permitir, por exemplo, a discriminação entre grafita e sulfetos metálicos de interesse econômico (Pelton *et al.*, 1978). Estes últimos autores verificaram que os parâmetros espectrais  $c$  e  $R_0$  variam pouco com o tipo de mineralização, sendo que o primeiro deles é um fator independente e praticamente constante, enquanto  $t$  e  $m$  são os mais importantes e estão relacionados com o aumento dos teores (incrementos simultâneos de  $m$  e  $t$ ) e da granulometria (aumento de  $t$  e diminuição de  $m$ ) do minério. Os experimentos de Pelton *et al.* (1978) demonstraram também que a discriminação espectral entre mineralizações disseminadas, maciças e em vênulas (*veinlets*), não depende da composição química, mas sim do hábito ou da granulometria do minério. Após a remoção das distorções provocadas pelo acoplamento eletromagnético, os resultados são interpretados através de um programa de inversão, determinando-se os quatro parâmetros espectrais ( $R_0$ ,  $m$ ,  $t$  e  $c$ ), os quais fornecem a curva de dispersão Cole-Cole que mais se ajustou aos dados de SIP medidos, além do

## Polarização Induzida Espectral

erro médio quadrático (*rms*) da cargabilidade verdadeira.

No modo Cole-Cole empregado na presente pesquisa, no domínio do tempo (2s), as curvas de decaimento medidas são comparadas com curvas teóricas calculadas com um expoente *c* fixo e igual a 0.25 (incorporado ao *software* do equipamento em função dos experimentos de Pelton *et al.*, 1978) e *t* entre 10 ms e 100 s, de modo que os dados apresentados deste último parâmetro correspondem às curvas teóricas que melhor se ajustaram aos dados observados. O sistema de polarização induzida utilizado nos ensaios, fabricado pela *Iris Instruments*, envolve um receptor multicanal (ELREC-10), o qual permite investigar dez níveis de profundidade, um transmissor (VIP-3000) com potência máxima de 3 kW, alimentado por um gerador Honda EM5000.

### Geologia do Alvo Paqueiro

A área do Paqueiro constitui-se de uma seqüência clasto-química, formada por camadas com espessuras de centenas de metros de mármore intercalados a filitos e calco-filitos, com direção geral N45°E e mergulhos de alto ângulo preferencialmente para SE. Os mármore são predominantes e em geral calcíticos.

A segunda litologia mais importante são filitos avermelhados que ocorrem em camadas menos espessas. Intercalados nos filitos ocorrem na porção SE da seqüência, calco-filitos parcialmente cobertos por colúvios provenientes dos quartzitos que sustentam a Serra do Carumbé. Todo o conjunto de rochas do Paqueiro é cortado por diques básicos de direção N45W, geralmente com poucos metros de espessura.

Falhas transversais de direção E-W cortam a seqüência, gerando deslocamentos horizontais dextrais de até 200 metros. A mina do Paqueiro é composta basicamente por dois filões lenticulares subverticais de direção geral N60E, com 30 e 60 metros de extensão, profundidade desconhecida, e espessuras de 1m, atingindo um máximo de 2,5 metros. O minério do Paqueiro é constituído principalmente por cerussita, galena, piromorfita, limonita, pirita e quartzo, tendo como ganga os carbonatos. Ouro e prata ocorrem associados à mineralização. A prospecção geoquímica de solo, utilizando-se o método *mobile metal ion (mmi)*, revelou inúmeras anomalias de Cu (máximo de 54 vezes o *background*); Pb (máximo de 62 vezes o *background*) e Zn (máximo de 26 vezes o *background*).

### Resultados Obtidos

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 1 a 7 e foram derivados de duas linhas de SIP (LT-04NE e LT-00), espaçadas de 100m, com 1.000 e 800 m de extensão, respectivamente, na direção NW-SE, perpendicular às estruturas. O arranjo empregado foi o dipolo-dipolo (*a* = 50m), com seis (LT-00) e oito (LT-04NE) níveis de investigação, respectivamente. As profundidades adotadas para os mencionados níveis, em função dos espaçamentos do arranjo utilizado, foram aquelas sugeridas por Edwards (1977), ou seja, *n*1 = 21m; *n*2 = 35m; *n*3 = 48m; *n*4 = 61m; *n*5 = 74m e *n*6 = 87m.

Todos os dados foram processados no módulo IP da *Geosoft OASIS Montajã (5.06)*, e os resultados das inversões da resistividade aparente e da cargabilidade global (cálculos dos modelos de profundidade) foram obtidos através do pacote *Zonge 2D Inversion for Interactivã IP*, da *Interpex/Geosoft*.

Como pode-se observar na Figura 1, a pseudo-seção da cargabilidade global aparente mostra um padrão típico de corpos verticais polarizáveis. Nota-se que o modelo obtido por inversão da mencionada variável definiu dois corpos, sendo que só aquele situado a SE, centrado no piquete 10 SE, coincidiu com fortes anomalias de Pb, entre 20 e 60 vezes o *background*, localizadas entre as estações 08-10 SE. Já o corpo mais polarizável, centrado no piquete 04 SE revelou apenas anomalias de Cu em torno de 10 vezes o *background* (Figura 3). A Figura 2 mostra os resultados da inversão dos dados de resistividade aparente, onde ressalta-se uma zona de baixa resistividade verdadeira posicionada em torno da estação 08 SE. É interessante ressaltar que a pseudo-seção da constante de tempo (Figura 4) define com clareza uma anomalia com altos índices de *t*, definindo um corpo ente os piquetes 10-12 SE, justamente coincidente com anomalias de Pb de cerca de 60 vezes o *background* (Figura 3). Este fato induz à interpretação de que o parâmetro espectral discriminou um provável corpo sulfetado em detrimento do outro a NW, o qual deve refletir uma grande contribuição de outros minerais polarizáveis.

Os resultados da inversão dos dados de cargabilidade e resistividade aparente da LT-00 mostram claramente a existência de dois corpos polarizáveis e de baixas resistividades, centrados nas estações 4 SE e 5 NW. Neste caso, todos os segmentos compreendidos entre as mencionadas estações revelam anomalias geoquímicas significativas (35 de Cu, 27 de Pb e Zn e 15 de Cd), sugerindo a existência de corpos mineralizados em subsuperfície.

## Polarização Induzida Espectral

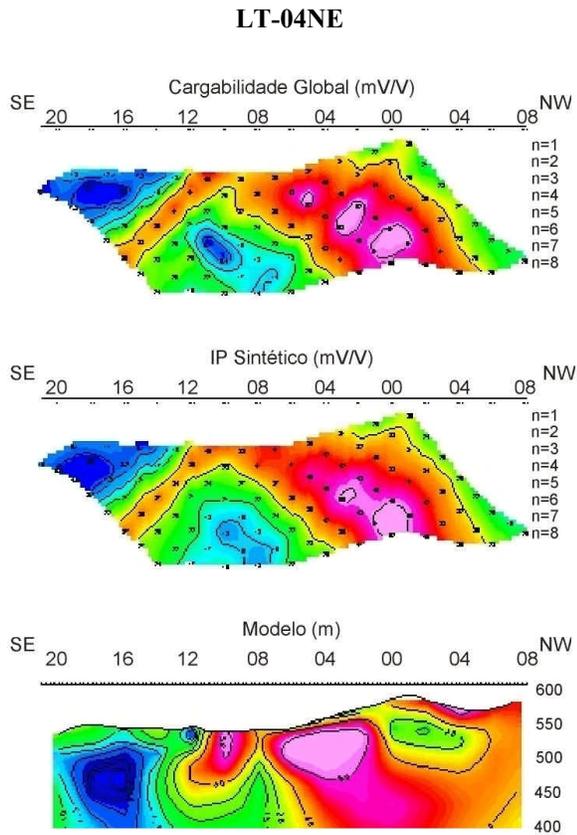


Figura 1 – Pseudo-seções de cargabilidade aparente e o modelo de profundidade obtido por inversão.

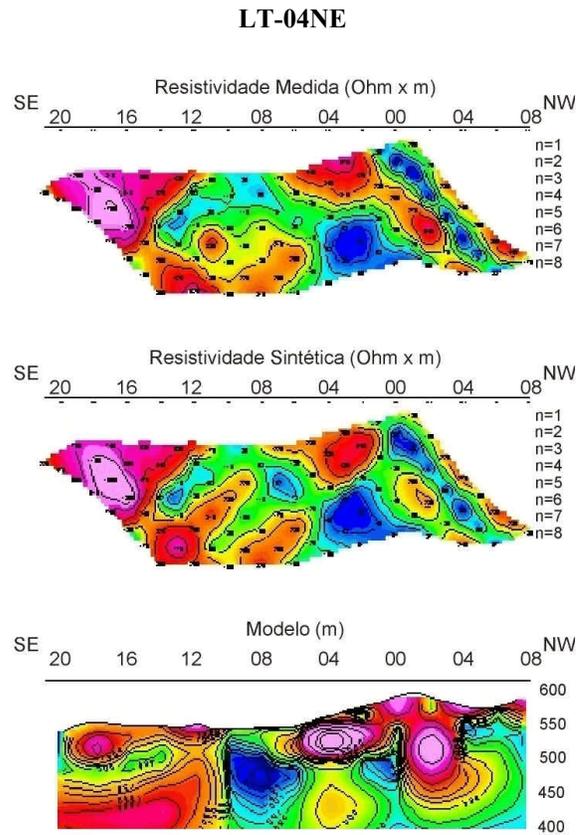


Figura 2 – Pseudo-seções de resistividade aparente e o modelo de profundidade obtido por inversão.

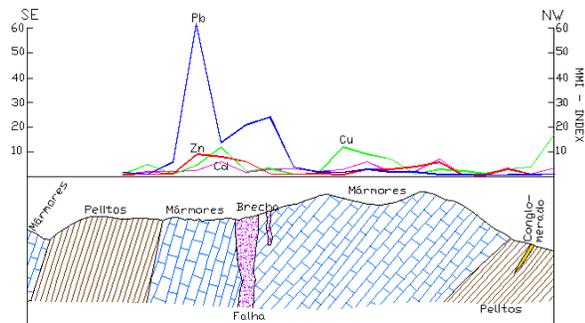


Figura 3 – Perfil geológico-geoquímico da LT-04NE.

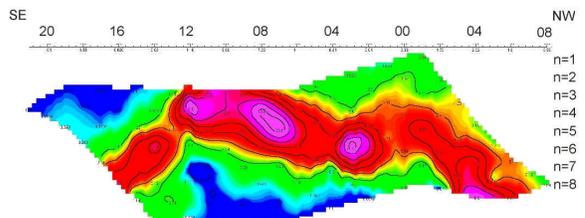


Figura 4 – Pseudo-seção da constante de tempo ( $t$ ).

## Polarização Induzida Espectral

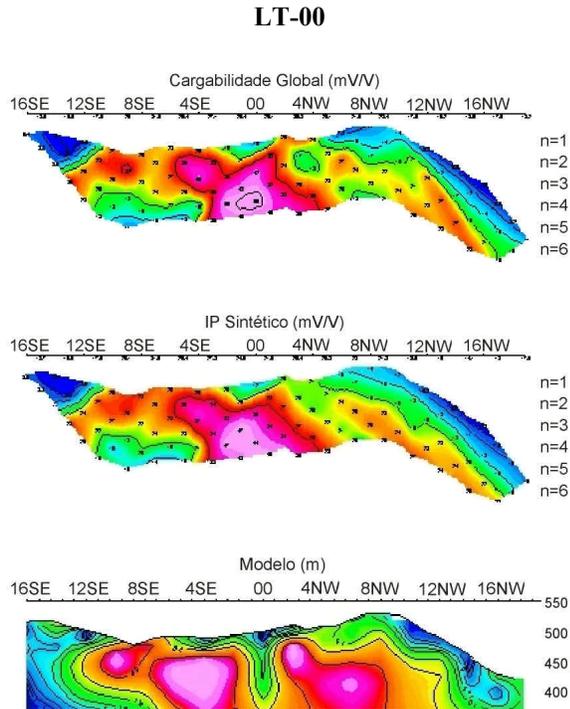


Figura 5 – Pseudo-seções de cargabilidade aparente e o modelo de profundidade obtido por inversão.

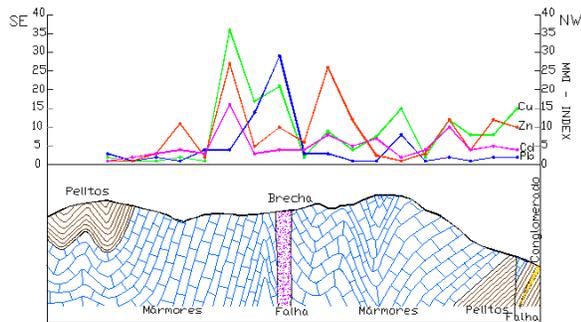


Figura 7 - Perfil geológico/geoquímico da LT-00.

### Conclusões

Os trabalhos de polarização induzida espectral (SIP) realizados sobre fortes anomalias geoquímicas em solos de Cu-Pb-Zn-Cd, dosadas pelo método *mobile metal ion (mmi)*, sugeriram a existência de corpos polarizáveis (sulfetados) em subsuperfície, os quais devem ser confirmados por sondagens rotativas.

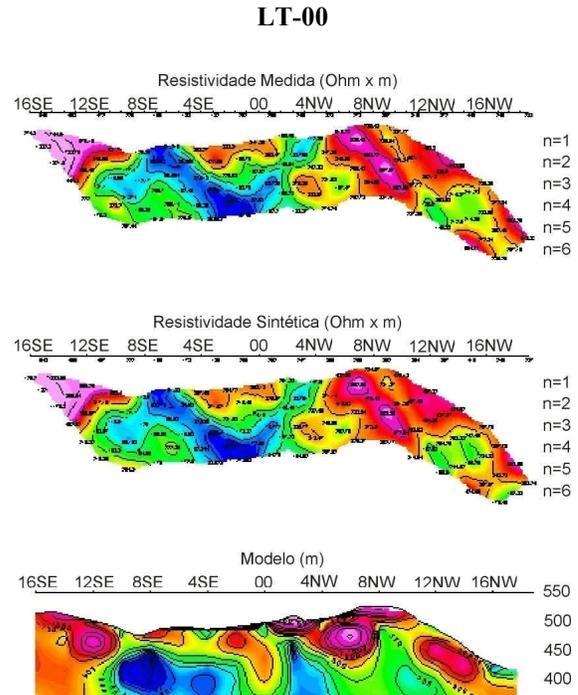


Figura 6 – Pseudo-seções de resistividade aparente e o modelo de profundidade obtido por inversão.

**Agradecimentos** Os autores agradecem ao Projeto Geofísica Aplicada CNPq/PADCT, Contrato N° 62.0155/97-3, o apoio para esta pesquisa.

### Referências Bibliográficas

- Cole, K.S. & Cole, R.H. 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *J. Chem. Phys.* v. 9, p. 341.
- Dias, C.A. 1972. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 77 (26):4945-4956.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, v.42, p. 1020-1036.
- Johson, I.M. 1990. Spectral IP parameters from time-domain measurements, p. 57-78. *In: Induced Polarization—Applications and Case Histories*, SEG.
- Loke, M.H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *Advanced Geosciences, Inc.* 58p. (<http://www.agiusa.com>).
- Pelton, W.H. *et al.* 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, v. 43, p. 588-609.
- Sampaio, E.S. *et al.* 1993. Polarização Induzida Espectral em Santa Luz - Ba. 3º Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGf, RJ, v.I, p.503-508.



## Ensaio de Polarização Induzida Espectral (SIP) Aplicados à Exploração Mineral de Chumbo e Zinco nos Corpos Canoas 2 e Canoas 3, Vale do Ribeira-PR

Francisco José Fonseca Ferreira<sup>(1)</sup>; Elias Carneiro Daitx<sup>(2)</sup>; Rodoilton Stevanato<sup>(1)</sup>; Maximilian Forlin<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA/UFPR; <sup>(2)</sup>IGCE/UNESP/RioClaro-SP

### Abstract

The Spectral Induced Polarization method (SIP) involves techniques considered to complement those as resistivity and chargeability methods in traditional induced polarization surveys. The paper discusses the results derived from a line that runs 1,325 m across Canoas 2 and Canoas 3 bodies identified through rotary sounding. Dipole-dipole with  $a = 50$  m was the electrode array used. The mineralized areas correspond to sulphide concentration (sphalerite, galena, pyrite, pirrotyte), with average grades of 3.5% (Zn), 3.2% (Pb) and 63 g/ton (Ag). Inversion of the mean IP values allowed a good subsurface delimitation of the bodies, and the analysis of the spectral parameters (time constant and true chargeability) shows simultaneous elevation of those parameters at depths that correspond to those of the mineralized bodies.

### Introdução

O método da polarização induzida (*induced polarization - IP*) é frequentemente empregado na exploração mineral, sobretudo na prospecção de metais base e de ouro, em fases avançadas da pesquisa, as quais, normalmente, orientam e precedem as campanhas de sondagem. Recentemente, a equipe do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada - LPGA/UFPR, juntamente com pesquisadores do Instituto de Geociências da UNESP/Rio Claro-SP, realizou ensaios de polarização induzida espectral (*spectral induced polarization - SIP*) com o objetivo de testar a performance do método e avaliar os resultados em concentrações sub-superficiais (depósitos “cegos”) de sulfetos metálicos estratiformes (Zn-Pb-Ag), detectadas por sondagens rotativas na área da jazida Canoas, município de Adrianópolis, PR.

### O Método da Polarização Induzida Espectral

O método da polarização induzida espectral - SIP envolve uma série de técnicas vistas como complementares às da resistividade e cargabilidade dos tradicionais levantamentos de IP. Tal método pode adotar os modelos de impedância Cole-Cole (Cole & Cole, 1941) ou o de Dias (1972) para estudar os efeitos da polarização induzida espectral nos domínios da frequência (eg. Sampaio *et al.*, 1993) ou do tempo (eg. Johnson, 1990). A impedância complexa (função transferência) depende da

resistividade -  $R_0$ ; da voltagem relativa residual registrada após a interrupção de um pulso muito longo (cargabilidade verdadeira -  $m$ ); da constante de tempo -  $t$  e do expoente -  $c$ , os quais descrevem as formas das curvas de decaimento no domínio do tempo, ou o espectro de fase no domínio da frequência. Pelton *et al.* (1978), sugeriram que a impedância complexa de uma fonte polarizável simples pode ser expressa como segue:

$$Z(\omega) = R_0 \{ 1 - m [ 1 - 1 / (1 + i\omega t)^c ] \}$$

onde:  $Z(\omega)$  = impedância complexa (  $\Omega$  );  $R_0$  = resistividade (  $\Omega$  );  $m$  = cargabilidade verdadeira (V/V);  $t$  = constante de tempo (s);  $\omega$  = frequência angular (1/s);  $c$  = expoente e  $i = (-1)^{1/2}$ .

Para alvos convencionais de IP,  $t$  varia desde mili-segundos até índices superiores a 100 segundos e está relacionada com a granulometria (*grain size*) dos minerais polarizáveis. O expoente  $c$  varia, via de regra, entre 0.1 e 0.5 e constitui um parâmetro relacionado à uniformidade granulométrica dos alvos. O SIP é primeiramente utilizado para definir a “textura” da mineralização metálica em subsuperfície, relacionando-se a constante de tempo -  $t$  do efeito IP medido, com a granulometria da mineralização (Pelton *et al.* 1978). Assim, em geral, a constante de tempo é pequena em mineralizações de granulação fina, verificando-se o contrário quando a mineralização é grossa, o que pode permitir, por exemplo, a discriminação entre grafita e sulfetos metálicos de interesse econômico (Pelton *et al.*, 1978). Estes últimos autores verificaram que os parâmetros espectrais  $c$  e  $R_0$  variam pouco com o tipo de mineralização, sendo que o primeiro deles é um fator independente e praticamente constante, enquanto  $t$  e  $m$  são os mais importantes e estão relacionados com o aumento dos teores (incrementos simultâneos de  $m$  e  $t$ ) e da granulometria (aumento de  $t$  e diminuição de  $m$ ) do minério. Os experimentos de Pelton *et al.* (1978) demonstraram também que a discriminação espectral entre mineralizações disseminadas, maciças e em vênulas (*veinlets*), não depende da composição química mas sim do hábito ou da granulometria do minério. Após a remoção das distorções provocadas pelo acoplamento eletromagnético, os resultados são interpretados através de um programa de inversão, determinando-se os quatro parâmetros espectrais ( $R_0$ ,  $m$ ,  $t$  e  $c$ ), os quais fornecem a curva de dispersão Cole-Cole que mais se ajustou aos dados de SIP medidos, além do

## Polarização Induzida Espectral

erro médio quadrático (*rms*) da cargabilidade verdadeira.

No modo Cole-Cole empregado na presente pesquisa, no domínio do tempo (2s), as curvas de decaimento medidas são comparadas com curvas teóricas calculadas com um expoente *c* fixo e igual a 0.25 (incorporado ao *software* do equipamento em função dos experimentos de Pelton *et al.*, 1978) e *t* entre 10 ms e 100 s, de modo que os dados apresentados deste último parâmetro correspondem às curvas teóricas que melhor se ajustaram aos dados observados. O sistema de polarização induzida espectral utilizado nos ensaios, fabricado pela *Iris Instruments*, envolve um receptor multicanal (ELREC-10), o qual permite investigar dez níveis de profundidade, um transmissor (VIP-3000) com potência máxima de 3kW, alimentado por um gerador Honda EM5000S.

### Geologia da Jazida Canoas

As mineralizações de zinco-chumbo-prata que compõem a jazida Canoas foram descobertas em 1981 no decorrer de um programa exploratório regional de metais base conduzido pela empresa Plumbum. A seleção da área foi feita a partir de anomalias detectadas em sedimentos de corrente e em solos; um programa de sondagens levou à descoberta de três corpos sulfetados (denominados Canoas 1, Canoas 2 e Canoas 3), cujas reservas totalizavam aproximadamente um milhão de toneladas de minério, com teores médios de 3,5 % de Zn, 3,2 % de Pb e 63 g/t de Ag. Os corpos Canoas 1 e Canoas 2 foram parcialmente lavrados no período entre 1988 e 1995; o corpo Canoas 3 não chegou a ser totalmente dimensionado devido ao encerramento das atividades de pesquisa e lavra na região, em 1995.

As mineralizações correspondem a concentrações de sulfetos (esfalerita, galena, pirita, pirrotita) em rochas baritíferas, carbonático/cálcio-silicáticas e carbonático-(micáceas) que integram a Unidade Intermediária do Complexo Perau, de suposta idade mesoproterozóica. A jazida é considerada do tipo sedimentar-exalativa, devido ao seu caráter estratiforme e à sua associação com camadas de barita e de formações ferríferas à magnetita (Daitx, 1996).

Os corpos Canoas 2 e Canoas 3 apresentam-se como lentes alongadas na direção NE-SW, com caimento regional ao redor de 10°, concordantes ao pacote carbonático encaixante, que apresenta espessura média da ordem de 25 m. O corpo Canoas 2 ocorre a profundidades variáveis entre 38 m e 47 m, apresentando uma largura aproximada de 200 m e espessura máxima de 7 m. O pacote mineralizado é

composto por uma camada rica em barita, na base, com espessura ao redor de 2 m, sobreposta por rochas carbonático-cálcio-silicáticas e por rochas (carbonático)-micáceas na porção superior. Nas porções inferior e média do pacote, a mineralização é predominantemente do tipo disseminada, com galena > esfalerita > pirita; na porção superior predomina a esfalerita sobre a galena, com maior participação de pirrotita, formando minérios do tipo semi-maciço; no topo predomina pirita e/ou pirrotita em minérios do tipo semi-maciço e maciço, com participação subordinada dos demais sulfetos. O corpo Canoas 3 ocorre a maiores profundidades (entre 78 m e 101 m) e apresenta largura da ordem de 160 m, com espessura máxima de 7,5 m. Na seção atravessada ocorrem apenas os minérios do tipo carbonático/cálcio-silicático e (carbonático)-micáceo, com características semelhantes às dos minérios do corpo Canoas 2; no topo ocorre igualmente um nível enriquecido em pirrotita, na forma de minérios do tipo semi-maciço e maciço.

### Resultados Obtidos

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 1 a 5 e foram derivados de uma linha de *SIP* sobre os corpos Canoas 2 e Canoas 3, com 1.325 m de extensão e direção NW-SE, perpendicular à dos corpos, na qual foi empregado o arranjo dipolo-dipolo com *a* = 50m e seis níveis de investigação. As profundidades adotadas para os mencionados níveis, em função do espaçamento do arranjo utilizado, foram aquelas sugeridas por Edwards (1977), ou seja, *n*<sub>1</sub> = 21m; *n*<sub>2</sub> = 35m; *n*<sub>3</sub> = 48m; *n*<sub>4</sub> = 61m; *n*<sub>5</sub> = 74m e *n*<sub>6</sub> = 87m, mais aproximadas das profundidades reais dos corpos do que as normalmente aplicadas em levantamentos de *IP*. Tal disposição eletródica, entretanto, não é a ideal em situações onde predominam estruturas horizontais (Figura 2), uma vez que o arranjo dipolo-dipolo discrimina melhor a variação horizontal de resistividade/cargabilidade, ou seja, estruturas verticais estreitas (Loke, 2000). Para superar esta limitação, o segmento da linha correspondente ao corpo Canoas 2 foi também perfilado no modo Cole-Cole, com o arranjo Wenner (*a* = 25m), mais sensível à variações verticais e portanto mais adequado para a presente situação geológica, contemplando oito níveis de investigação. Os resultados obtidos, assim como a comparação com os dados oriundos do arranjo dipolo-dipolo, serão objeto de outra nota.

Todos os dados foram processados no módulo *IP* da *Geosoft OASIS Montajã* (5.06), e os resultados das inversões da resistividade e da cargabilidade

## Polarização Induzida Espectral

aparentes foram obtidos através do pacote *Zonge 2D Inversion for Interactivã IP*, da *Interpex/Geosoft*.

Como se pode observar nas figuras 1 e 2, as pseudoseções de cargabilidade e de resistividade não apresentam padrões típicos de corpos verticalizados, em função da realidade geológica, o que dificulta a interpretação do posicionamento das concentrações mineralizadas. Entretanto, o modelo de profundidade obtido por inversão dos dados aparentes de *IP* (Figura 1) foi considerado satisfatório, uma vez que identificou com clareza o posicionamento dos dois corpos de minério (valores de cargabilidade entre 5 e 10 mV/V para ambos os corpos), como também logrou êxito na definição aproximada de suas profundidades (compare as figuras 1 e 3), além de refletir a disposição das camadas do perfil geológico. Já o modelo da Figura 2, ao contrário, mostrou diferenças significativas da resistividade nos segmentos ocupados pelos corpos Canoas 2 e Canoas 3. No primeiro deles os valores variaram entre 500 à maiores que 1.000  $\Omega \cdot m$ , enquanto no outro as resistividades modeladas são bem maiores (500 a > 10.000  $\Omega \cdot m$ ). Tais índices podem ser interpretados pelos contrastes de espessuras de rochas resistivas entre os mencionados estratos (Figura 2). A Figura 2, portanto, reflete as propriedades elétricas das litologias envolvidas e não os corpos mineralizados, talvez como decorrência das pequenas espessuras de material condutivo quando comparadas com o semi-espaço resistivo. Por outro lado, as baixas resistividades aparentes da porção central do perfil (Figura 2) constituem resposta de uma zona intensamente fraturada/falhada, com soerguimento do embasamento quartzítico de pelo menos 30m, caracterizando um *horst* entre as estações 600N e 800N, o que permite maior infiltração e percolação das águas superficiais e subterrâneas, respectivamente, portanto incrementando a condutividade elétrica no citado segmento do perfil geológico (compare as figuras 2 e 3).

### Parâmetros Espectrais

A pseudoseção espectral da constante de tempo (**t**), apresentada na Figura 4, identifica bem os dois corpos de minério, posicionados entre as estações 950-1075N e 450-550N (Figura 3), não obstante as distorções provocadas pela disposição dos estratos. Já a Figura 5, da cargabilidade verdadeira (**m**), não reflete claramente os dois corpos pelos mesmos motivos citados anteriormente. Os valores de **t** e **m** típicos dos corpos Canoas 2 e 3 são apresentados nas tabelas 1 e 2, respectivamente, juntamente com outros parâmetros da polarização induzida (cargabilidade

global aparente – **IP(a)** e resistividade aparente – **Res(a)**. É interessante notar na Tabela 1 que existe um incremento de **t** e **m** nos níveis 2 e 3, em correspondência ao Corpo Canoas 2, o mesmo ocorrendo com a cargabilidade global aparente. Já na Tabela 2, tais incrementos são verificados nos níveis 5 e 6, justamente coincidentes com a profundidade do corpo Canoas 3. Nota-se também nas referidas tabelas que a resistividade aparente diminui nos citados níveis. Os índices espectrais médios de **t** são 2.41 e 0.71 e os de **m** são 83 e 62, para os corpos Canoas 2 e 3, respectivamente, sugerindo, de acordo com Pelton *et al.* (1978), que os teores deveriam ser maiores no primeiro deles. Os dados divulgados por Daitx (1996), em contraste, mostram que os teores são maiores em Canoas 3, da ordem de 3,4 % de Pb e 4,0 % de Zn, do que em Canoas 2 (2,5 % de Pb e 2,5 % de Zn). Entretanto, tais dados não refletem o conjunto dos sulfetos. Considerando que pirita e galena predominam no Corpo Canoas 2, e que as elevadas quantidades de esfalerita em detrimento da galena estão associados, relativamente, com pouca pirita em Canoas 3 (Daitx 1996), é possível explicar o incremento da cargabilidade aparente e dos parâmetros espectrais em Canoas 2 como função da maior contribuição da pirita em relação à galena.

Níveis	IP(a)	Res(a)	t	m
n1=21m	4.7	68	0.02	74
n2=35m	5.8	120	0.12	86
n3=48m	6.5	148	7.70	92
n4=61m	7.0	196	5.37	97
n5=74m	6.0	300	1.25	73
n6=87m	6.0	300	0.02	75
Média	6.0	189	2.41	83

Tabela 1 – Parâmetros espectrais do corpo Canoas 2.

Níveis	IP(a)	Res(a)	t	m
n1=21m	4.0	138	0.04	61
n2=35m	3.9	143	0.02	59
n3=48m	4.4	139	0.26	61
n4=61m	4.3	131	3.13	58
n5=74m	4.4	121	0.60	63
n6=87m	5.1	100	0.18	68
Média	4.3	128	0.71	62

Tabela 2 – Parâmetros espectrais do corpo Canoas 3.

### Conclusões

Os resultados e a interpretação dos ensaios de polarização induzida espectral (*SIP*), realizados sobre depósitos “cegos” da jazida Canoas, mostraram-se satisfatórios uma vez que: 1) permitiram posicionar em profundidade os corpos Canoas 2 e 3; 2) o modelo de cargabilidade global verdadeira, obtido por inversão, refletiu a disposição horizontalizada do

## Polarização Induzida Espectral

minério e dos estratos geológicos; 3) o incremento dos parâmetros espectrais e da cargabilidade aparente em Canoas 2 foi interpretada pela maior contribuição de pirita, em relação à Canoas 3, apesar dos menores teores de chumbo e zinco.

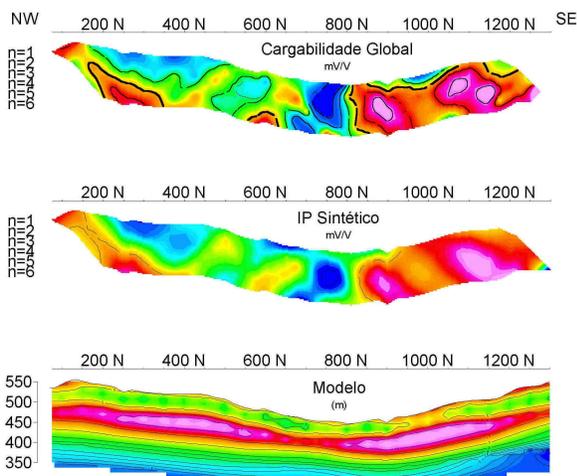


Figura 1 – Pseudo-seções de cargabilidade aparente e o modelo de profundidade obtido por inversão.

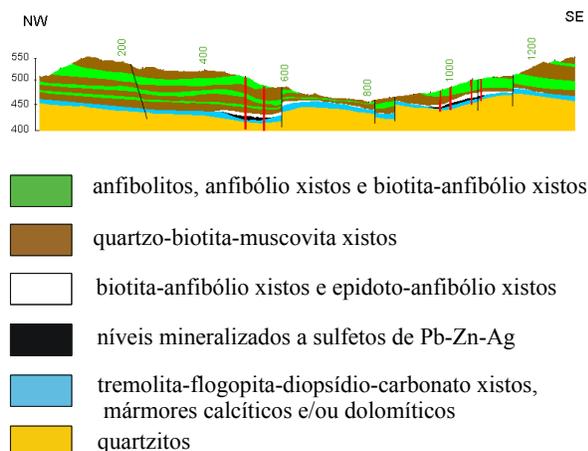


Figura 3 – Perfil geológico indicando os corpos de minério Canoas 3 (NW) e Canoas 2 (SE).

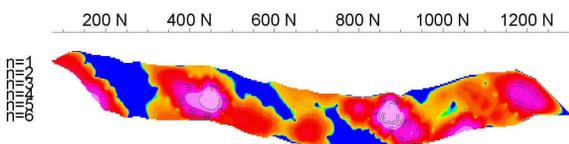


Figura 4 – Pseudoseção da constante de tempo ( $t$ ).

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Projeto Geofísica Aplicada CNPq/PADCT, Contrato N° 62.0155/97-3, o apoio para a realização desta pesquisa.

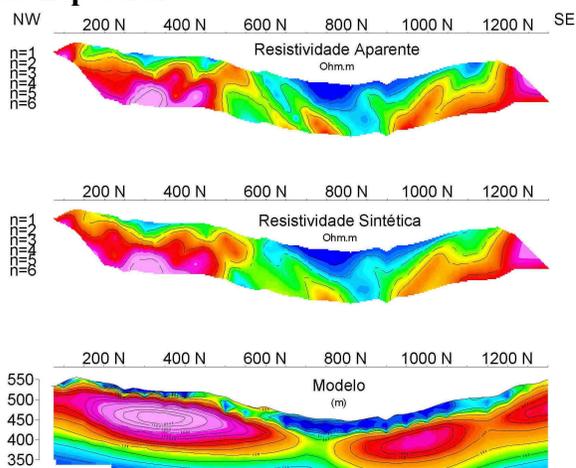


Figura 2 – Pseudo-seções de resistividade aparente e o modelo de profundidade obtido por inversão.

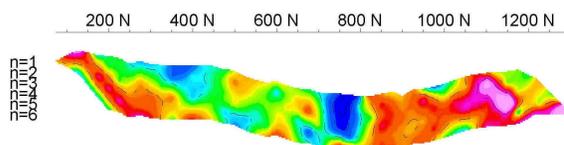


Figura 5 – Pseudo-seção da cargabilidade verdadeira.

### Referências Bibliográficas

- Cole, K.S. & Cole, R.H. 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *J. Chem. Phys.* v. 9, p. 341.
- Daitx, E.C. 1996. Origem e evolução dos depósitos tipo-Perau (Pb-Zn-Ag), com base nas jazidas Dourados e Perau, Vale do Ribeira-PR. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, UNESP, Rio Claro, 435p.
- Dias, C.A. 1972. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 77 (26):4945-4956.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, v.42, p. 1020-1036.
- Johson, I.M. 1990. Spectral IP parameters from time-domain measurements, p. 57-78. In: *Induced Polarization – Applications and Case Histories*, SEG.
- Loke, M.H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *Advanced Geosciences, Inc.* 58p. (<http://www.agiusa.com>).
- Pelton, W.H. et al. 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, v. 43, p. 588-609.
- Sampaio, E.S. et al. 1993. Polarização Induzida Espectral em Santa Luz - Ba. 3º Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGf, RJ, v.I, p.503-508.

## Ensaios de Polarização Induzida Espectral (SIP) Aplicados à Exploração Mineral de Cobre e Chumbo na Área Galeria Velha, Vale do Ribeira-PR

Francisco José Fonseca Ferreira <sup>(1)</sup>; Rodoilton. Stevanato <sup>(1)</sup>; José Roberto de Góis <sup>(2)</sup>, Luciano Stasiak <sup>(2)</sup>  
<sup>(1)</sup> Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA/UFPR; <sup>(2)</sup> Geoplanejamento Pesquisa Mineral e Geologia Ambiental Ltda.

### Abstract

The present work shows de assays of Spectral Induced Polarization (SIP), in gradient and dipole-dipole modes, on occurrences of metallic sulphides and geochemical anomalies of Cu-Pb-Zn-Au in soils, on the region of Vale do Ribeira – PR. In gradient mode, the spectral parameter of time constant has reflected a fault zone that lodges the main mineralization recognaized in surface. The main axes of apparent cargability coincide with graphitic marble lens (carbonous). The inversion models of apparent chargeability and resistivity data, obtained with the dipole-dipole array, have defined whit accuracy the lithological contact between calcitic marbles and impure calcitic marbles, with graphitic intercalations.

### Introdução

O método da polarização induzida (*induced polarization - IP*) é freqüentemente empregado na exploração mineral, sobretudo na prospecção de metais base e ouro, em fases avançadas da pesquisa, as quais, normalmente, orientam e precedem as campanhas de sondagem. Recentemente, a equipe do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada - LPGA/UFPR, juntamente com pesquisadores da Geoplanejamento, Pesquisa Mineral e Geologia Ambiental Ltda., realizou ensaios de polarização induzida espectral (*spectral induced polarization - SIP*) com o objetivo de testar a performance do método e avaliar os resultados em ocorrências superficiais de sulfetos metálicos (Cu-Pb-Au-Ag), detectadas por mapeamento geológico e geoquímicas de solos, na área denominada Galeria Velha, município de Adrianópolis, Vale do Ribeira – PR (Figura 1).

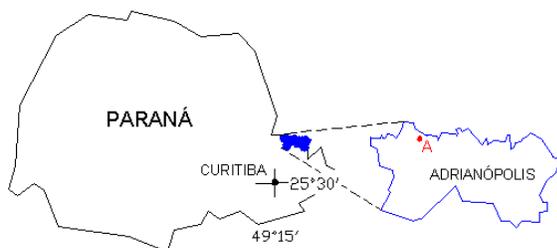


Figura 1 – Mapa de localização da área investigada.  
 A = Galeria Velha.

### O Método da Polarização Induzida Espectral

O método da polarização induzida espectral - *SIP* envolve uma série de técnicas vistas como complementares às da resistividade e cargabilidade dos tradicionais levantamentos de *IP*. Tal método pode adotar os modelos de impedância Cole-Cole (Cole & Cole, 1941) ou o de Dias (1972) para estudar os efeitos da polarização induzida espectral nos domínios da freqüência (*eg.* Sampaio *et al.*, 1993) ou do tempo (*eg.* Johnson, 1990). A impedância complexa (função transferência) depende da resistividade -  $R_0$ ; da voltagem relativa residual registrada após a interrupção de um pulso muito longo (cargabilidade verdadeira -  $m$ ); da constante de tempo -  $t$  e do expoente -  $c$ , os quais descrevem as formas das curvas de decaimento no domínio do tempo, ou o espectro de fase no domínio da freqüência. Pelton *et al.* (1978), sugeriram que a impedância complexa de uma fonte polarizável simples pode ser expressa como segue:

$$Z(\omega) = R_0 \{ 1 - m [ 1 - 1 / (1 + i\omega t)^c ] \}$$

onde:  $Z(\omega)$  = impedância complexa (  $\Omega$  );  $R_0$  = resistividade (  $\Omega$  );  $m$  = cargabilidade verdadeira (V/V);  $t$  = constante de tempo (s);  $\omega$  = freqüência angular (1/s);  $c$  = expoente e  $i = (-1)^{1/2}$ .

Para alvos convencionais de *IP*,  $t$  varia desde mili-segundos até índices superiores a 100 segundos e está relacionada com a granulometria (*grain size*) dos minerais polarizáveis. O expoente  $c$  varia, via de regra, entre 0.1 e 0.5 e constitui um parâmetro relacionado à uniformidade granulométrica dos alvos. O *SIP* é primeiramente utilizado para definir a “textura” da mineralização metálica em subsuperfície, relacionando-se a constante de tempo -  $t$  do efeito *IP* medido, com a granulometria da mineralização (Pelton *et al.* 1978). Assim, em geral, a constante de tempo é pequena em mineralizações de granulação fina, verificando-se o contrário quando a mineralização é grossa, o que pode permitir, por exemplo, a discriminação entre grafita e sulfetos metálicos de interesse econômico (Pelton *et al.*, 1978). Estes últimos autores verificaram que os parâmetros espectrais  $c$  e  $R_0$  variam pouco com o tipo de mineralização, sendo que o primeiro deles é um fator independente e praticamente constante, enquanto  $t$  e  $m$  são os mais importantes e estão

## Polarização Induzida Espectral

relacionados com o aumento dos teores (incrementos simultâneos de **m** e **t**) e da granulometria (aumento de **t** e diminuição de **m**) do minério. Os experimentos de Pelton *et al.* (1978) demonstraram também que a discriminação espectral entre mineralizações disseminadas, maciças e em vênulas (*veinlets*), não depende da composição química, mas sim do hábito ou da granulometria do minério. Após a remoção das distorções provocadas pelo acoplamento eletromagnético, os resultados são interpretados através de um programa de inversão, determinando-se os quatro parâmetros espectrais (**R<sub>o</sub>**, **m**, **t** e **c**), os quais fornecem a curva de dispersão Cole-Cole que mais se ajustou aos dados de *SIP* medidos, além do erro médio quadrático (*rms*) da cargabilidade verdadeira.

No modo Cole-Cole empregado na presente pesquisa, no domínio do tempo (2s), as curvas de decaimento medidas são comparadas com curvas teóricas calculadas com um expoente **c** fixo e igual a 0.25 (incorporado ao *software* do equipamento em função dos experimentos de Pelton *et al.*, 1978) e **t** entre 10 ms e 100 s, de modo que os dados apresentados deste último parâmetro correspondem às curvas teóricas que melhor se ajustaram aos dados observados. O sistema de polarização induzida espectral utilizado nos ensaios, fabricado pela *Iris Instruments*, envolve um receptor multicanal (ELREC-10), o qual permite investigar dez níveis de profundidade, um transmissor (VIP-3000) com potência máxima de 3kW, alimentado por um gerador Honda EM4500X.

### Geologia da Área Galeria Velha

As litologias predominantes na área Galeria Velha envolvem uma unidade carbonática bastante diferenciada, na qual se intercalam lentes de metapelitos aluminosos e carbonáticos e, subordinadamente, mármores “carbonosos”. Todo o conjunto é atribuído à Formação Votuverava (Grupo Açungui). Ao sul, em contato com os metapelitos, predominam mármores calcíticos “puros”, de cor cinza claro a escuro, mais enriquecidos em CaO e depletados em SiO<sub>2</sub>, FeO e MgO, relativamente aos demais tipos. Ocorre ainda uma intercalação de lente de mármore “carbonoso” (grafitoso) de coloração preta, contendo cristais de pirita. Na porção centro-norte aflora uma unidade de mármores calcíticos “impuros”, caracterizada por intercalações de cálcio-filitos e calcarenitos. À nordeste dominam mármores “bandados”, com alternância rítmica de bandas cinza (calcíticas) e bandas claras (magnesianas/dolomíticas). Finalmente, no extremo sul da malha, aflora a unidade metapelítica formada

por quartzo-mica xistos, filitos e cálcio-filitos, localmente tectonizados, gerando uma foliação tipicamente anastomosada. O mapa geológico da área é apresentado na Figura 2.

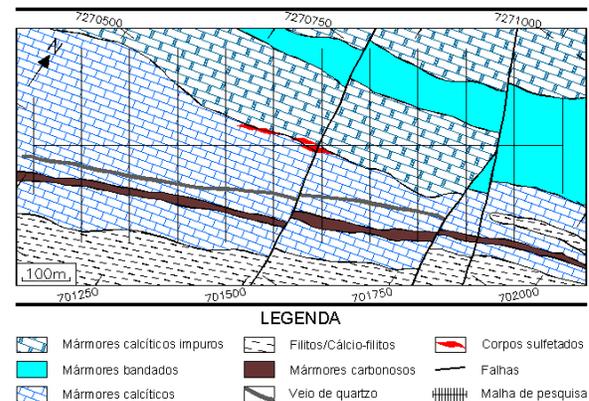


Figura 2 – Mapa geológico simplificado da área das ocorrências de Galeria Velha - PR.

Os diagramas da foliação principal  $S_n$  indicam a presença de dobramentos regionais, cujos eixos estatísticos situam-se em torno de N64E, com caimentos desde horizontais até 22°. Estes valores são compatíveis com os eixos de microdobras medidos em afloramentos. Já a leitura do diagrama de roseta revela que o principal sistema rúptil presente na área está orientado segundo a classe N15-30W, seguido pela seguinte ordem: N30-45W, N0-15W, N75-90E, N45-60E e N0-15E, sendo que o sistema N15-30W afeta diretamente os corpos sulfetados através de fálhamentos com rejeito anti-horário.

O levantamento geoquímico realizado nas várias etapas do projeto envolveu 167 amostras de solo e 30 de minério e rocha. As amostras de canal em trincheira forneceram os seguintes resultados analíticos: 301-3670 ppm de Pb, 146-163 ppm de Zn, 141-230 ppm de Cu e 1-5 ppm de Ag. As análises realizadas em fragmentos de *gossans* recuperados de trincheiras, mostraram teores de 1203-3896 ppm de Cu, 0,56-3,0 % de Pb, 104-215 ppm de Zn e 2-37 ppm de Ag. As amostras de minério aflorante, coletadas em vários corpos de sulfeto, resultou nos seguintes teores: 0,15-0,56 % de Cu, 0,98-2,7% de Pb, 131-193 ppm de Zn, 1-78 ppm de Ag e 0,17-6,12 ppm de Au.

### Resultados Obtidos

Os dados de polarização induzida espectral foram adquiridos segundo dois arranjos eletródicos, gradiente e dipolo-dipolo. No primeiro deles foi utilizada uma linha de corrente (AB) com 1.500 m de extensão, enquanto as medidas dos parâmetros

## Polarização Induzida Espectral

relacionados com o aumento dos teores (incrementos simultâneos de **m** e **t**) e da granulometria (aumento de **t** e diminuição de **m**) do minério. Os experimentos de Pelton *et al.* (1978) demonstraram também que a discriminação espectral entre mineralizações disseminadas, maciças e em vênulas (*veinlets*), não depende da composição química, mas sim do hábito ou da granulometria do minério. Após a remoção das distorções provocadas pelo acoplamento eletromagnético, os resultados são interpretados através de um programa de inversão, determinando-se os quatro parâmetros espectrais (**R<sub>o</sub>**, **m**, **t** e **c**), os quais fornecem a curva de dispersão Cole-Cole que mais se ajustou aos dados de *SIP* medidos, além do erro médio quadrático (*rms*) da cargabilidade verdadeira.

No modo Cole-Cole empregado na presente pesquisa, no domínio do tempo (2s), as curvas de decaimento medidas são comparadas com curvas teóricas calculadas com um expoente **c** fixo e igual a 0.25 (incorporado ao *software* do equipamento em função dos experimentos de Pelton *et al.*, 1978) e **t** entre 10 ms e 100 s, de modo que os dados apresentados deste último parâmetro correspondem às curvas teóricas que melhor se ajustaram aos dados observados. O sistema de polarização induzida espectral utilizado nos ensaios, fabricado pela *Iris Instruments*, envolve um receptor multicanal (ELREC-10), o qual permite investigar dez níveis de profundidade, um transmissor (VIP-3000) com potência máxima de 3kW, alimentado por um gerador Honda EM4500X.

### Geologia da Área Galeria Velha

As litologias predominantes na área Galeria Velha envolvem uma unidade carbonática bastante diferenciada, na qual se intercalam lentes de metapelitos aluminosos e carbonáticos e, subordinadamente, mármores “carbonosos”. Todo o conjunto é atribuído à Formação Votuverava (Grupo Açungui). Ao sul, em contato com os metapelitos, predominam mármores calcíticos “puros”, de cor cinza claro a escuro, mais enriquecidos em CaO e depletados em SiO<sub>2</sub>, FeO e MgO, relativamente aos demais tipos. Ocorre ainda uma intercalação de lente de mármore “carbonoso” (grafitoso) de coloração preta, contendo cristais de pirita. Na porção centro-norte aflora uma unidade de mármores calcíticos “impuros”, caracterizada por intercalações de cálcio-filitos e calcarenitos. À nordeste dominam mármores “bandados”, com alternância rítmica de bandas cinza (calcíticas) e bandas claras (magnesianas/dolomíticas). Finalmente, no extremo sul da malha, aflora a unidade metapelítica formada

por quartzo-mica xistos, filitos e cálcio-filitos, localmente tectonizados, gerando uma foliação tipicamente anastomosada. O mapa geológico da área é apresentado na Figura 2.

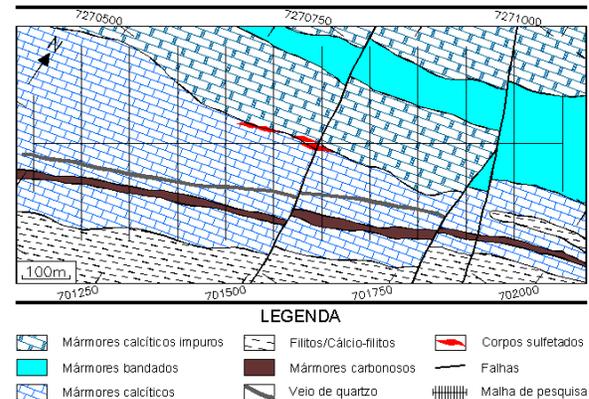


Figura 2 – Mapa geológico simplificado da área das ocorrências de Galeria Velha - PR.

Os diagramas da foliação principal  $S_n$  indicam a presença de dobramentos regionais, cujos eixos estatísticos situam-se em torno de N64E, com caimentos desde horizontais até 22°. Estes valores são compatíveis com os eixos de microdobras medidos em afloramentos. Já a leitura do diagrama de roseta revela que o principal sistema rúptil presente na área está orientado segundo a classe N15-30W, seguido pela seguinte ordem: N30-45W, N0-15W, N75-90E, N45-60E e N0-15E, sendo que o sistema N15-30W afeta diretamente os corpos sulfetados através de fálhamentos com rejeito anti-horário.

O levantamento geoquímico realizado nas várias etapas do projeto envolveu 167 amostras de solo e 30 de minério e rocha. As amostras de canal em trincheira forneceram os seguintes resultados analíticos: 301-3670 ppm de Pb, 146-163 ppm de Zn, 141-230 ppm de Cu e 1-5 ppm de Ag. As análises realizadas em fragmentos de *gossans* recuperados de trincheiras, mostraram teores de 1203-3896 ppm de Cu, 0,56-3,0 % de Pb, 104-215 ppm de Zn e 2-37 ppm de Ag. As amostras de minério aflorante, coletadas em vários corpos de sulfeto, resultou nos seguintes teores: 0,15-0,56 % de Cu, 0,98-2,7% de Pb, 131-193 ppm de Zn, 1-78 ppm de Ag e 0,17-6,12 ppm de Au.

### Resultados Obtidos

Os dados de polarização induzida espectral foram adquiridos segundo dois arranjos eletródicos, gradiente e dipolo-dipolo. No primeiro deles foi utilizada uma linha de corrente (AB) com 1.500 m de extensão, enquanto as medidas dos parâmetros

## Polarização Induzida Espectral

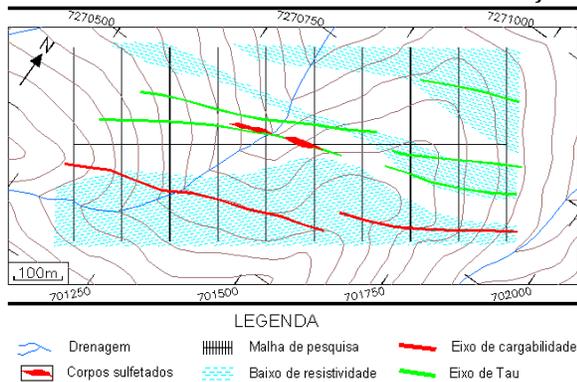


Figura 7 – Mapa de interpretação geofísica.

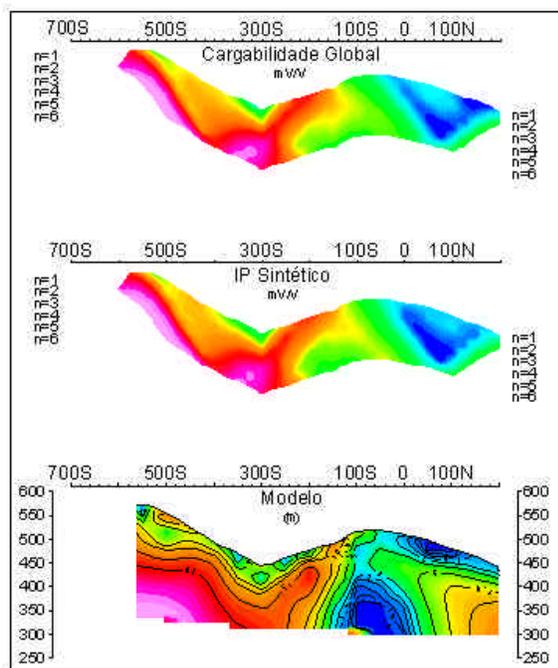


Figura 8 – Pseudo-seções de cargabilidade e o modelo de profundidade obtido por inversão (LT-700).

### Conclusões

Os resultados e a interpretação dos ensaios de polarização induzida espectral (SIP), realizados na área das ocorrências de Galeria Velha, permitiram concluir: 1) o parâmetro espectral da constante de tempo, no modo gradiente, permitiu delinear uma zona de falha coincidente com exposições de sulfetos e anomalias geoquímicas de chumbo, zinco e ouro em solos; 2) as modelagens derivadas da inversão dos dados de cargabilidade e resistividade aparentes indicaram a continuidade em profundidade da citada zona de falha, apontando para o potencial da área e para o aprofundamento da pesquisa.

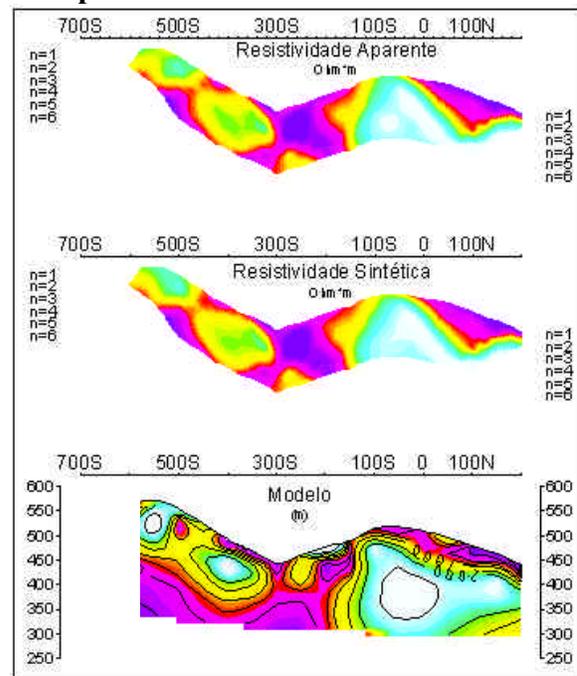


Figura 9 – Pseudo-seções de resistividade e o modelo de profundidade obtido por inversão (LT-700).

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Projeto Geofísica Aplicada CNPQ/PADCT, Contrato N° 62.0155/97-3 e à Paraná Comércio, Administração S.A., a liberação dos dados.

### Referências Bibliográficas

- Cole, K.S. & Cole, R.H. 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *J Chem. Phys.* v. 9, p.341.
- Dias, C.A. 1972. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 77 (26):4945-4956.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, v.42, p. 1020-1036.
- Johson, I.M. 1990. Spectral IP parameters from time-domain measurements, p. 57-78. In: *Induced Polarization – Applications and Case Histories*, SEG.
- Loke, M.H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *Advanced Geosciences, Inc.* 58p. (<http://www.agiusa.com>).
- Pelton, W.H. et al. 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, v. 43, p. 588-609.
- Sampaio, E.S. et al. 1993. Polarização Induzida Espectral em Santa Luz - Ba. 3º Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGf, RJ, v.I, p.503-508.



# ESTUDIO MAGNÉTICO SOBRE UN CUERPO DE PÓRFIDO EMPLAZADO EN EL ÁREA DE MARAYES VIEJO, SIERRAS PAMPEANAS OCCIDENTALES, SAN JUAN, ARGENTINA <sup>(\*)</sup>.

*Silvana Blanco<sup>1</sup>, Eduardo Machuca<sup>2</sup>, Patricia Alvarado<sup>1</sup>, Pablo Cruz, Brígida Castro de Machuca<sup>1,3</sup>*

1-Dpto. Geofísica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina

2- Dpto. Geología. INGENIO, Universidad Nacional de San Juan, Argentina

3-CONICET. INGENIO, Universidad Nacional de San Juan, Argentina

<sup>(\*)</sup>Investigación subsidiada por CICITCA-UNSJ

## ABSTRACT

A magnetic survey was carried out in an andesite porphyry outcrop (PMV), located in the southwestern end of the La Huerta range, Western Pampean Ranges, San Juan, Argentina. The PMV was intruded within the precambrian-lower paleozoic crystalline basement, and covered in non-concordance by triassic sedimentary rocks. Vein and disseminated sulfide mineralization was recognized in the PMV.

To increase previous knowledge, twenty N45°W magnetic profiles, with variable length between 400-725 m and separated 25 m, were laid out.

The qualitative interpretation of the resulting magnetic maps (Total Field, Analytic Signal and Vertical Derivate), allowed to outline the PMV in depth and distinguish it from the surrounding lithologies. They also showed the main structures present in the area.

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito de las Sierras Pampeanas Occidentales de la provincia de San Juan, se han reconocido manifestaciones magmáticas de edad neopaleozoica-mesozoica que representan al ciclo orogénico-metalogénico gondwánico (1) (2). Las investigaciones efectuadas en el extremo sur de la sierra de La Huerta y regiones adyacentes a la misma, permitieron identificar un cuerpo de pórfido andesítico (Pórfido Marayes Viejo: PMV) en la zona de contacto entre el basamento cristalino que conforma la mencionada sierra, y el borde oriental de la cuenca mesozoica de Marayes-El Carrizal, aproximadamente a los 31°26' Latitud Sur y 67°22' Longitud Oeste (figura 1).

El PMV, objeto de este trabajo, está siendo investigado en conjunto con otros afloramientos ígneos del área, con la intención de establecer su relación genética con las manifestaciones de oro y metales base atribuidas al ciclo gondwánico (3), y definir su importancia desde el punto de vista minero, lo que incrementaría el interés prospectivo del sector.

Con este estudio se completan los datos obtenidos en un levantamiento magnético preliminar de la zona (4), lográndose mayores detalles de la morfología, dimensiones, relaciones con los encajonantes y controles de emplazamiento del PMV. La aplicación del método magnético ha tenido en cuenta el buen contraste de susceptibilidades magnéticas entre el cuerpo ígneo, las

rocas de caja metamórficas y la cubierta sedimentaria, además de la operatividad en el terreno, el bajo costo y la confiabilidad de esta técnica de prospección. En esta oportunidad se han incorporado otras técnicas de procesamiento, logrando mapas de Campo Total, Señal Analítica y Primera Derivada.

## ESTRATIGRAFIA DEL ÁREA (figura 1)

Basamento cristalino (Precámbrico-Paleozoico inferior)  
Está constituido por rocas ígneo-metamórficas en facies de anfibolitas de alto grado y facies de granulitas subfacies con hornblenda. En la zona de trabajo se reconocen principalmente litologías ortoderivadas: metatonalitas y metadioritas, que son rocas de color gris verdoso y grano medio a grueso, compuestas por plagioclasa, cuarzo, biotita y/u hornblenda como minerales esenciales. Poseen abundantes enclaves microgranulares máficos elongados según la foliación regional, con azimut promedio N 334°.

En menor proporción se identifican paragneises biotítico-granatíferos, de color pardo oscuro, que a menudo presentan características migmatíticas. Están intensamente deformados y son frecuentes las inyecciones pegmatoides.

En áreas circundantes al PMV, las rocas del basamento poseen alteración propilitica moderada a intensa.

Basalto Marayes Viejo (BMV) (Pérmico inferior). Se localiza unos 300 m al oeste del PMV, en el límite del área estudiada. Se trata de una colada depositada sobre el basamento cristalino, sobre la cual se asientan en concordancia las sedimentitas triásicas. La misma consta de un cuerpo principal de forma tabular, con una longitud aproximada de 500 m y un espesor medio de 15 m, elongado en sentido NO-SE y buzante al oeste. Una falla inversa de azimut N330° buzante al oeste, lo sobreeleva y separa de otro subcuerpo de menor altura (5). El BMV muestra en su base una facies volcánoclastica bien desarrollada, con abundantes fragmentos de rocas basálticas juveniles (líticos cognatos) y metamorfitas subordinadas.

Pórfido Marayes Viejo (PMV) (Pérmico superior). Es un cuerpo de forma irregular y dimensiones reducidas intruido en el basamento cristalino, que se manifiesta como una lomada de relieve suave, con apófisis que

siguen la foliación de las metamorfitas y que cortan también al BMV. Los contactos son netos y de tipo intrusivo, sin evidencias de fenómenos térmicos. Hacia el S y SO está cubierto por las sedimentitas triásicas en relación de no-concordancia.

El PMV tiene color gris mediano casi siempre enmascarado por pátinas limoníticas. La textura es porfirica con fenocristales (20-40%) de plagioclasa, hornblenda y biotita en orden decreciente de abundancia, en una pasta de idéntica composición con cuarzo subordinado. Domina la alteración propilítica.

Tanto en el basamento como en el PMV, se reconocen dos sistemas principales de fracturación de direcciones N15° y N333°, en los que se han emplazado angostas venillas de cuarzo con pirita, calcopirita, cobre nativo, oro, galena y magnetita. En el PMV también hay mineralización diseminada de sulfuros. Las leyes obtenidas indican anomalías de interés económico (3).

Formación Esquina Colorada (Triásico medio). Constituye el miembro basal del Grupo Marayes (6). Está compuesta por areniscas micáceas y conglomerados finos con rodados del basamento, que se disponen en bancos subhorizontales gruesos y discontinuos, de color rojo ladrillo - gris rojizo, con estratificación entrecruzada débil y rumbo NNO-SSE. No se han encontrado fósiles en esta unidad que es interpretada como depósitos fanglomerádicos.

### **ESTRUCTURA DEL ÁREA**

Desde Marayes hasta el sector central de la sierra de La Huerta, el modelo estructural se caracteriza por bloques limitados por fracturas escalonadas que tienen como frente estructural la megafractura de Valle Fértil, dispuesta a lo largo del flanco occidental serrano. La reactivación de esta megafractura, que es un corrimiento del basamento de dirección N30°-35°O, vergencia al oeste y alto ángulo en superficie que varía en profundidad hasta casi horizontalizarse, fue responsable del ascenso de la sierra (7). El emplazamiento del PMV en el contacto entre el basamento y el borde oriental de la cuenca mesozoica, fue probablemente controlado por esa megafractura.

Por su parte, las sedimentitas triásicas han actuado plásticamente generando amplias estructuras sinclinales.

En las proximidades del área de estudio se identifican tres sistemas de fallas (6) (8): a) fallas regionales de rumbo NNO-SSE, con importante expresión morfológica, entre las que se destacan las fallas Rickard y de Las Chacras o Pan de Azúcar, que limitan al Triásico por el oeste y lo sobrepone a sedimentos cuaternarios, b) fallas regionales de rumbo NE-SO que confluyen en las anteriores y ocasionalmente las cortan, pudiendo considerarse conjugadas de aquéllas y c) fallas locales transversales de rumbo ESE-ONO limitadas entre las anteriores.

La zona de trabajo está afectada por el sistema de fallamiento Rickard con actividad neotectónica comprobada. La recurrencia de este fallamiento es

responsable de la cataclisis observada por sectores, con desarrollo de brechas de falla post-mineral.

### **RELEVAMIENTO MAGNÉTICO**

#### Trabajo de campo:

La intensidad del campo magnético total se midió a lo largo de 20 perfiles con un azimut de 315°, separados cada 25 m, utilizando dos magnetómetros Scintrex MP-2. Este diseño ha tenido en cuenta la disposición de los perfiles realizados con anterioridad (4), y su objetivo ha sido lograr una mayor densidad de información en el área ampliando la zona de trabajo. La longitud de los perfiles magnéticos varió entre 400 y 725 m. Para cada perfil las estaciones de medición se efectuaron cada 25 m. La Estación Base, situada sobre el PMV, se seleccionó teniendo en cuenta la operatividad del trabajo y el bajo nivel de ruidos magnéticos, a fin de corregir la variación diurna que afecta a todas las mediciones.

El valor base regional se fijó en  $F=23000g$ , acorde con el valor del campo magnético total obtenido de una carta geomagnética de la zona.

#### Procesamiento de la información.

Con los datos obtenidos en la Estación Base, se ha determinado una curva de la variación del campo magnético terrestre expresada en función del tiempo observado. El rango de variación es de  $\pm 45g$ . Dicha curva sirve de base para separar este efecto de los datos de campo. La información se ha procesado con el software Geosoft para Windows (Oasis Montaj) (9), confeccionándose mapas de "Campo Magnético Total", "Señal Analítica" y "Primera Derivada Vertical del Campo Total".

### **INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

La interpretación cualitativa se realizó utilizando los mapas antes mencionados (figuras 2 a 4). En una primera etapa se correlacionaron entre sí, y luego con la información geológica existente, ya que cada uno provee herramientas diferentes al momento de discutir y evaluar los resultados.

En el mapa de Campo Magnético Total (figura 2), se visualizan claramente los máximos (23955g) y mínimos (23337g) encontrados. En el sector donde aflora el PMV, los valores son de aproximadamente 23650g, determinando una forma irregular para dicho cuerpo, con dimensiones mayores desde el punto de vista geofísico (380 x 260 m) que las que revela su exposición en superficie (aproximadamente 200 x 250 m). Hacia el N, O y SE, por debajo de las sedimentitas, continúan valores que corresponden al PVM.

Los colores de la figura 2 indican, hacia el NE, valores de campo magnético más bajos que los usualmente hallados para las rocas del basamento cristalino, y muy similares a los del PMV (zona marcada con línea de puntos azules en los distintos mapas magnéticos). En el caso específico de Marayes Viejo, estos valores se relacionan con rocas

metamórficas que en ese sector están fuertemente alteradas (propilitizadas) por efectos del hidrotermalismo derivado del PMV. No obstante, este resultado podría también atribuirse a la continuación del pórfido bajo el basamento. En este sentido, cabe sugerir una prospección magnética hacia el norte, a fin de confirmar o descartar tal hipótesis.

Los valores bajos en el campo magnético total para el PMV, se deben a que posee una alteración hidrotermal sobrepuesta distribuida irregularmente, más filica hacia el centro y más propilitica hacia los bordes.

En el sector sur del mapa de Campo Total existen "altos magnéticos" que se estima corresponden a la presencia en profundidad, por debajo de las sedimentitas y en dirección al SE, del BMV. La discriminación entre el PMV y el BMV no fue posible con las técnicas empleadas en este trabajo.

En el mismo mapa, al norte del PMV y sobre las metamorfitas, se observan "bajos magnéticos", cuya vinculación con esta litología se confirmaría extendiendo los perfiles en la dirección mencionada. Con respecto a los valores "bajos" encontrados en el sector sur, existe una buena correlación con la colada del BMV. De acuerdo a lo observado en el mapa de Señal Analítica (figura 3), estos valores pueden asociarse a algún tipo de magnetización remanente.

Además del dominio litoestratigráfico descrito, es posible delimitar en los mapas de Campo Total y Señal Analítica, un dominio estructural. Se observan lineamientos del campo magnético terrestre característicos de las anomalías provocadas por fallas, fenómeno claramente visible en el mapa de Primera Derivada del Campo Total (figura 4). En el mismo se advierte la continuidad de la falla de rumbo NO-SE que provoca el levantamiento del BMV: estructura (a). También se evidencia otro lineamiento de rumbo NO-SE que atraviesa al PMV: estructura (b), probablemente vinculado a la megafractura de Valle Fértil. Los numerosos lineamientos de rumbos NNO-SSE, NE-SO y ESE-ONO, son compatibles con el sistema de fallamiento "Las Chacras" (8).

## CONCLUSIONES

A partir de la interpretación cualitativa del estudio magnético, ha sido posible definir con precisión las dimensiones del PMV, el cual tiene un desarrollo longitudinal de 380 m por 260 m en sentido perpendicular al anterior. Estas medidas son mayores que las observadas en superficie, como se había inferido en el trabajo previo, de carácter más general (4). No obstante, cabe destacar un pequeño corrimiento horizontal entre los valores de campo magnético total y la localización de las unidades litoestratigráficas aflorantes, provocado por la geometría de dicho campo para el sector estudiado.

De acuerdo a estudios de sismica de refracción que se están realizando en la zona, tres perfiles sísmicos han determinado que la profundidad aproximada del techo del PMV (espesor de las sedimentitas) es de 5 m, con una zona alterada inmediatamente subyacente de 28 m de potencia,

que correspondería a la parte superior más alterada del pórfido. Estos resultados confirman los obtenidos en la prospección magnética.

El estudio magnético evidencia con nitidez la falla de rumbo NO-SE que afecta al BMV. Además se observa un lineamiento de rumbo NO-SE, aprovechado para la intrusión del PMV, que se vincula a la megafractura de Valle Fértil.

Es aconsejable extender los perfiles magnéticos en direcciones NO y SE para estimar claramente la respuesta del BMV. También se sugiere efectuar un estudio paleomagnético sobre muestras del BMV y del basamento cristalino, con el objeto de determinar el magnetismo remanente de las mismas, a fin de diferenciar estas anomalías en los mapas y lograr una mejor interpretación.

## AGRADECIMIENTOS

A la Lic. Inés Bilbao y alumnos de la carrera de Licenciatura en Geofísica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, por su colaboración en las tareas de campo.

## LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- (1) Ramos, V., F. Munizaga y G. Marín, 1988. Las riolitas neopaleozoicas de la Sierra de Huerta, provincia de San Juan: evidencias de una metalogénesis aurífera gondwánica en Sierras Pampeanas. 3° Congreso Nacional de Geología Económica, I: 149-159, Olavarría.
- (2) Castro de Machuca, B., C. Sumay, A. Conte-Grand y E. Meissl, 1998: Nueva evidencia de magmatismo neopaleozoico en las Sierras Pampeanas Occidentales: el pórfido Marayes Viejo, San Juan, Argentina. X Congreso Latinoamericano de Geología, II: 331-336, Buenos Aires.
- (3) Castro de Machuca, B., C. Sumay, A. Conte-Grand, E. Meissl y S. Pontoriero, 1999: Manifestación de la metalogénesis gondwánica en el área de Marayes Viejo, Sierras Pampeanas Occidentales, San Juan. XIV Congreso Geológico Argentino, II: 312-315, Salta.
- (4) Alvarado, P., E. Machuca, B. Castro de Machuca y S. Blanco, 1999. Prospección magnética en el área de Marayes Viejo, Sierras Pampeanas Occidentales, San Juan, Argentina. 6° Congress of Brazilian Geophysical Society: 226-229. Río de Janeiro. Editado en CD.
- (5) Castro de Machuca B., N. Bruno, C. Sumay, S. Pontoriero y E. Meissl, 2000: Relaciones estratigráficas y edad relativa del volcanismo basáltico en la cuenca de Marayes- El Carrizal, San Juan, Argentina. IX Congreso Geológico Chileno, I: 451-455, Puerto Varas.
- (6) Bossi, G., 1976. Geología de la cuenca de Marayes-El Carrizal. 6° Congreso Geológico Argentino, I: 23-38, Bahía Blanca.
- (7) Baldis, B., R. Martínez, R. Villegas, E. Pereyra y A. Pérez, 1990. Estructura, provincialismo geológico y unidades tectonoestratigráficas de San Juan. En: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de San Juan. 11° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 186-211, San Juan.
- (8) Treo, C., N., Weidman, M. Perez y C. Gallardo, 1988. Análisis morfo-estructural del sistema de fallamiento Las Chacras, como fuente sísmica potencial. Proyecto UNSJ-CONICET, pp42. Inédito.
- (9) OASIS Montaj V 5.0.6 (KZ). Copyright 2000. Geosoft Inc.

Figura 1 - Mapa Geológico

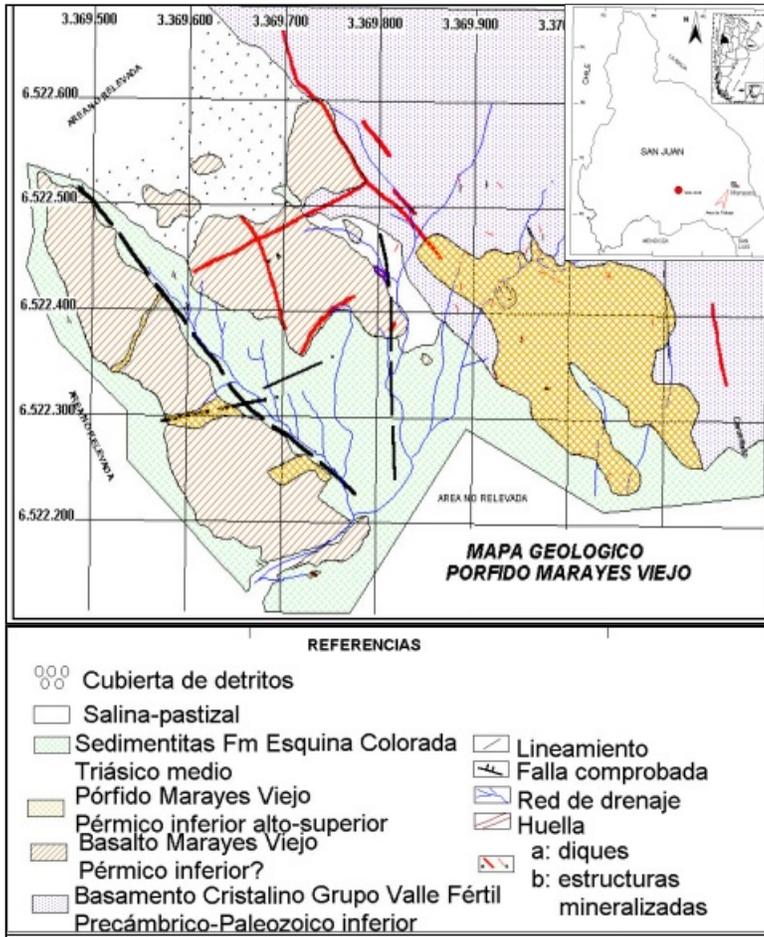


Figura 2 - Mapa de Campo Magnético Total. El máximo valor corresponde a 23955 g (magenta), mínimo 23337 g (azul).

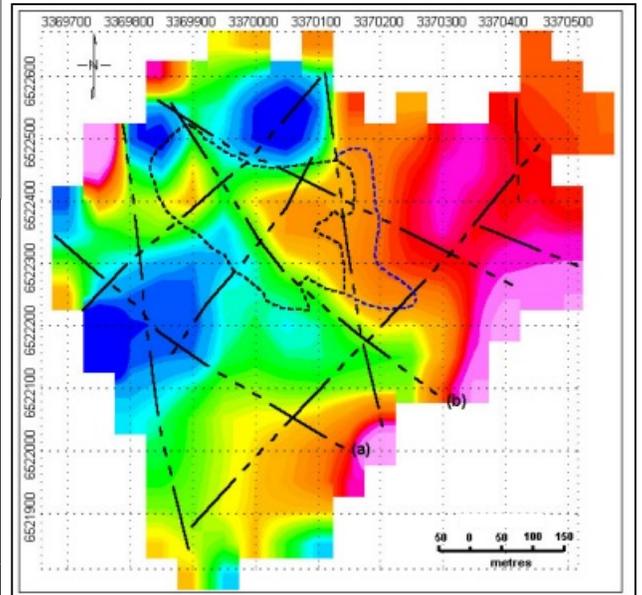


Figura 3 - Mapa de Señal Analítica. Los máximos están representados por las tonalidades del color magenta (valor máximo 15.3 g/m) y los mínimos por las tonalidades del color azul (valor mínimo 0.4 g/m).

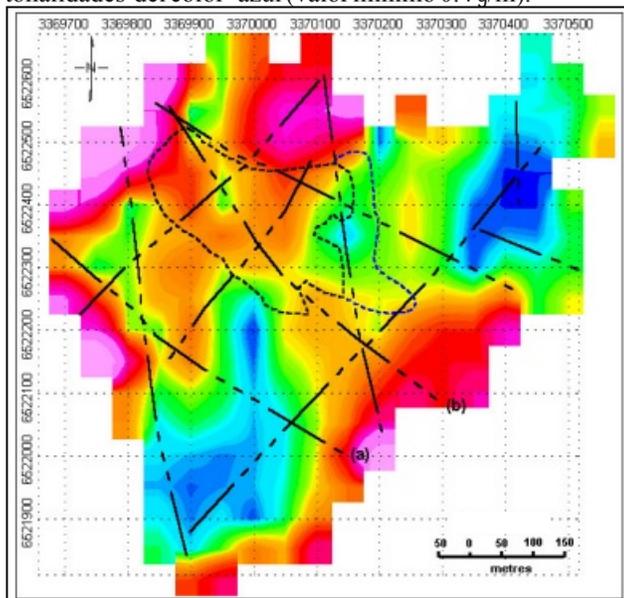
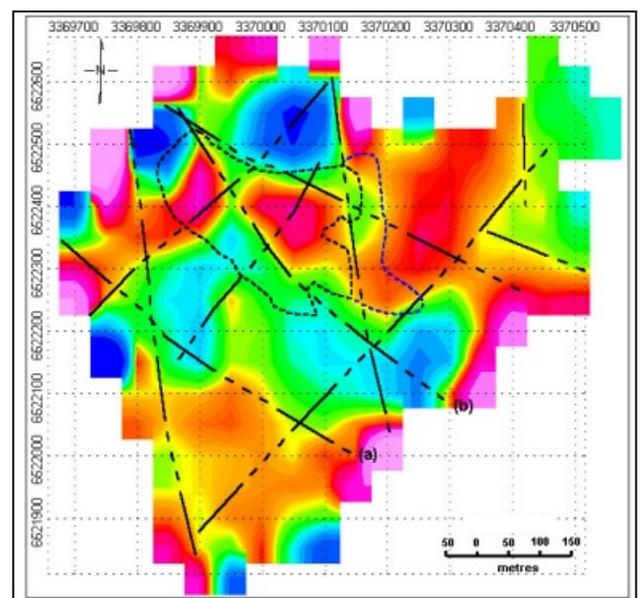


Figura 4 - Mapa de la Derivada Vertical del Campo Total. Máximo = 7.5 g/m (magenta), mínimo = -6.8 g/m (azul).





## Evaluation of combined TEM-CSAMT methods for gold prospecting in the Pau-a-Pique sub-area of the Fazenda Brasileiro Mine, Brazil

Max A. Meju\* and Sergio L. Fontes\*\*

\* Department of Geology, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, England. email: mxw@leicester.ac.uk

\*\* Observatorio Nacional-MCT, Rio de Janeiro, Brazil. email: sergio@on.br

### Abstract

The utility of joint TEM and CSAMT methods for structural mapping has been evaluated at the Pau-a-Pique sub-area of the Fazenda Brasileiro prospect, a Precambrian greenstone belt in Bahia state, Brazil which hosts auriferous sulphide deposits. The CSAMT and TEM data were separately acquired but jointly processed with attention being paid to the problem of static distortion of CSAMT data. The resistivity image of the subsurface generated by collating simple 1-D models for a trial survey line shows good correlation with the working geological model of the site. The result of 2-D inversion of the CSAMT data agrees structurally with that from the simple joint resistivity imaging but differs slightly in the depths to some resistivity boundaries. The interpretative model shows that the greenstone rock formations dip eastwards and clearly identify a concealed granite-greenstone contact. This contact and the underlying conductive formations have an undulating (folded?) structure which may have significant implications for prospecting since there is a widely held view by the Fazenda Brasileiro mine geologists that gold mineralisation tends to be associated with zones of thickening in the favourable horizon for sulphide mineralisation in this greenstone sequence. Recommendations for further work are also presented in this paper.

### Introduction

The transient electromagnetic (TEM) and controlled source audiofrequency magnetotelluric (CSAMT) methods are the mining industry standard when high productivity and resolution are needed owing to their proven ability to generate large volumes of high quality, geologically diagnostic data in the search for metallic sulphides and associated gold mineralisations (see Meju, 2001 and references therein). In this evaluation study, we are interested in the applicability of combined TEM and CSAMT methods in structural mapping for base metal exploration around the Fazenda Brasileiro gold mine. The mine is located in the Precambrian Itapicuru greenstone belt which lies about 150km north-northwest of Salvador in Bahia State (Figure 1). This greenstone belt is a volcano-sedimentary structure (part of the Serrinha complex) completely surrounded by granites and gneisses of the older Caraiba group. The structure strikes east-west in

the south and north-south in the northern part (see Palacky and Sena, 1979, Fig. 1). The greenschist metamorphosed volcano-sedimentary sequences are divisible into three units (Palacky and Sena, 1979): (1) a metavolcanic mafic unit comprising metabasalts, graphite schists, iron formations and intrusive gabbro dykes and sills; (2) metavolcanic felsic unit of acid and intermediate metavolcanic rocks, felsic lavas, volcanic breccias and tuffs; and (3) metasedimentary unit (making up about 40% of the exposed rocks in the area) and consisting of conglomerates, arkoses, pelites, graywackes, with frequent graphitic layers.

### Motivation for current evaluation study

Most Archaean greenstone belts are geologically complex such that the structural dimension is multi-dimensional and necessitating time-consuming quantitative modelling of geophysical survey data. However, it is often the case that the interpretation of commercial CSAMT data is limited to collating one-dimensional (1-D) models to yield a patched section (due to short reporting timeframe and/or inadequate contractual specifications by clients) leading sometimes to inaccurate geological inferences. Vast amounts of commercial CSAMT data were recently acquired over the Fazenda Brasileiro prospect and interpreted in terms of smooth 1-D models (Constable et al., 1987) by a geophysical contractor. It was noted that the interpretative models are not easily correlated to the assumed site geology. It is possible that this may be a consequence of static distortion of the CSAMT data or geological complexity at the site. To test this hypothesis, it was deemed necessary to re-interpret the CSAMT field data using 1-D and 2-D inversion techniques with controls on the distortion effects furnished by TEM soundings. Note that both methods are not usually combined in routine exploration campaigns owing to the financial constraints often imposed on typical exploration programs and traditional biases in the industry. Each of the methods has its strengths and weaknesses and it is well-known that an improved model of the subsurface can be obtained by combining various complementing geophysical measurements. It will therefore be instructive to see whether any improvements in subsurface mapping can be derived from joint TEM and CSAMT measurements in the Fazenda Brasileiro

## Combined TEM-CSAMT methods for gold prospecting of the Fazenda Brasileiro Mine, Brazil

environment. Bearing these issues in mind, TEM measurements were made in August 1996 along one of the CSAMT survey lines to:

- (i) assess the compatibility between the two methods;
- (ii) furnish effective data for correction of static shift in CSAMT data for 1-D and 2-D inversion; and
- (iii) evaluate the usefulness of the combined methods in subsurface mapping. The results obtained so far form the basis of this report.

### The Pau-a-Pique sub-area: Existing exploration model, rock properties and field surveys

The Pau-a-Pique sub-area is approximately flat and is covered by products of tropical weathering (mainly laterites). A geological exploration model derived by CVRD (Camp. Vale de Rio Doce) workers for the test area of study is shown in **Figure 2** and the known formational characteristics are listed in **Table 1**. The formations dip 40°-50° eastwards. Carbonate-chlorite schist (CCX) outcrop in the east and may have a 10m thick graphitic (GRX) horizon at its base.

Mine acronym (used in Figure 2)	Lithology and thickness	Average core specimen resistivity
CCX	Carbonate-chlorite schist, up to 330m thick	20 k $\Omega$ m
GRX	Graphite within CCX, 10m thick	45 $\Omega$ m
CLX(1) - target 1	Quartz-carbonate schist, 30-40m thick	933 k $\Omega$ m
SUF	High grade sulphide samples	400 $\Omega$ m
CAX	Chlorite-carbonate schist; may contain metagabbro	209 k $\Omega$ m
CLX(2) - target 2	Quartz-carbonate schist, similar to SUF; 10-20m thick	209 K $\Omega$ m
AGV	Meta-volcanic agglomerates	537 k $\Omega$ m
MT	Meta-tuff	102 k $\Omega$ m

**Table 1:** Description of lithological succession in the area and the petrophysical properties. The resistivity data on core samples are taken from the CSAMT contractor's report to CVRD.

It overlies the target quartz-chlorite schists (CLX) in the area. The working conceptual exploration model proposes that gold mineralisation tends to be

associated with zones of thickening in the favourable horizon for sulphide mineralisation in this greenstone sequence. Locating potential synclinal zones using surface geophysical methods may lead to cost-effective exploration for gold in the area. The available resistivity measurements on core samples (see **Table 1**) appear much higher than those published in the literature for comparable environments (see Meju, 2001 and references therein). However, the petrophysical data suggest that there might be good contrast in resistivity between GRX or SUF and CCX, CLX or CAX. Simple predictive modelling showed that the GRX or SUF unit could serve as a useful marker horizon for the EM methods. Our exploration strategy is therefore to track such horizons across the area from their outcrop positions. The Sirotem MK3 transient electromagnetic equipment was deployed along one of the CSAMT survey lines (Line 1200N). The soundings employed the single-loop geometry (which is appropriate to the CSAMT TM mode) with a 50m  $\times$  50m loop size and a station interval of 50m. The survey area is covered by a dense vegetation of thorny bushes and 10 contiguous-loop sounding positions were occupied during three hours of the trial soundings.

### Data processing and 1-D inversion results

TEM data processing involves converting the recorded transient decay curves into apparent resistivities (e.g., **Bai & Meju, 2000**). The manner in which the current is switched off influences the decay curves and was accounted for during data analysis (**Raiche, 1984**). In the CSAMT case, the data are available in the form of Cagniard apparent resistivities (in  $\Omega$  m) and impedance phases (in milliradians). Initial examination of the data sets showed that the sounding curves from all the stations along line 1200N were affected by near-field (and transition zone) effects. Fortunately, only the 8 Hz, 4 Hz and 2 Hz data were heavily affected and we therefore removed them from the interpretation process at most of the sites.

### Correction for static shift and 1-D data inversion

A major problem in CSAMT data analysis is the accurate removal of the frequency-independent static distortions of sounding curves caused by small-scale near-surface 3-D bodies. If left uncorrected, the depths and resistivities of subsurface targets determined using the field data are often grossly exaggerated. Partial remedies to the static shift problem are provided by pre-interpretation curve shifting using TEM constraints (e.g., Sternberg et al., 1988; Meju, 1996). We have used the Sirotem data to correct the CSAMT

## Combined TEM-CSAMT methods for gold prospecting of the Fazenda Brasileiro Mine, Brazil

data from coincident locations on line 1200N. Examples of CSAMT apparent resistivity data after static shift corrections are shown in **Figure 3**. Note the good match between the TEM and CSAMT data sets.

For comparison with the original interpretative section produced by the contractor and for possible correlation with geology, we have collated the various 1-D joint inversion models (Meju, 1996) for the TEM-CSAMT stations to form the resistivity cross-section shown in **Figure 4**. In this figure, the vertical axis represents depths in metres while the horizontal axis represents station positions in metres. East of position -400m, a general eastward dip (ca. 45°) of three possible stratigraphic units is apparent. The uppermost resistive (>100 m) unit extending from the near-surface at position -100m to a depth of about 330m underneath position 250m (east) is interpreted as a granitic body. According to CVRD geologists, a granite contact is expected within the TEM survey area but the exact subcrop position is unknown; we place the contact near position -75m to -100m. The underlying layer of moderate resistivity (50 to 100 m) is correlated to CCX while the next sequence below, which is conductive (<10 m) is interpreted as representing graphitic or sulphide-rich materials (GRX or SUF). The narrow surficial trough-like (preferentially-weathered) zone at positions -320 to -340m suggests that this conductor is thin and is taken as the outcropping segment of our favoured GRX marker horizon. The low resistivity (10-50 m) horizon outcropping to the west may be correlated to CLX while the relatively resistive units that outcrop over the rest of the transect may correspond to the CAX unit. Faulting is inferred at positions 160m and -340m. Overall, the basal part of the resistive structures and the upper portions of the immediately underlying conductive formations (east of position -400m) have an undulatory form which may have significant implications for prospecting in view of the noted structural controls on gold mineralisation by CVRD geologists. The trial survey line does not extend over much distance to fully characterise the other moderately resistive unit extending to over 400m in the west. It has a lower resistivity than the granite to the east but appears to be similar to the material immediately underlying the granite in the east. There is about 20m to 40m weathered cover over the whole structure and the zone of weathering appears to be thickest in the inferred GRX outcrop zone. In general, this cross-section is not too dissimilar to that produced by the contractor but the depths to possible geological

targets are shallower in our model noting that we corrected the CSAMT apparent resistivity curves to the level determined by the TEM data. Since we do not have access to borehole data in this area, we are unable to determine the practical resolving power of the joint TEM-CSAMT data sets.

### Preliminary 2-D inversion of CSAMT data

A modified 2D EM inversion program (Ulugergerli & Meju, 1997) has been used to interpret the static corrected CSAMT data. Since we do not have any borehole information or geological section from CVRD, we performed a 'blind interpretation' in which the subsurface is divided into several blocks of constant resistivity (initially set to 5 m for all blocks) and then iteratively modified until the computed responses of the numerical model fits the observed CSAMT data satisfactorily. A preliminary 2D inversion model is shown in **Figure 5**. Basically, the resistivity structure is comparable to that of **Figure 4** except that the depths to the bottom of the resistive horizons or bodies are shallower in the 2-D models. The two fault-like structures suggested in the 1-D model are apparent in this 2-D model. Further rigorous modelling studies are in progress using more densely parameterised 2-D models.

### Conclusions and recommendations

It has been shown that a joint TEM-CSAMT approach is necessary for improved depth constraint on resistivity models in the area. Since there was a suggestion by CVRD geologists that gold mineralisation appeared to be associated with favourable structural styles in the subsurface, an integrated field and numerical modelling study involving EM (and possibly seismic reflection surveys for structural definition) is recommended. In particular, we suggest the following strategic phases of investigative work: (i) Single-loop TEM survey of all CSAMT lines using 25m or 50m square transmitter loops for static corrections of CSAMT data and initial joint data analysis; (ii) Desk study of all available borehole lithological/depth data; (iii) Limited seismic reflection survey in most promising areas of sub-horizontal structures (based on TEM-CSAMT results) for more accurate geological structural mapping and improved detection of the structural features known from past mining activities to be associated with gold mineralisation in the area; (iv) Measurement of rock physical properties of available rock cores to obtain constraining data for automatic 2-D CSAMT inversion; (v) Down-hole TEM (DHEM) measurements to locate possible off-axis mineralisations and to provide additional constraints on 2D modelling of potential

## Combined TEM-CSAMT methods for gold prospecting of the Fazenda Brasileiro Mine, Brazil

auriferous target structures in the area; (vi) 2D inversion of joint TEM/CSAMT data with geological/borehole and seismic constraints to map possible auriferous structures.

### References

- Constable, S.C., Parker, R.L., & Constable, C.G., 1987. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 289-300.
- Palacky, G.J. and Sena, F.O., 1979. Conductor identification in tropical terrains - case histories from the Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil. *Geophysics*, 44, 1941-1962.
- Meju, M.A., 1996. Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: Some effective practical considerations. *Geophysics*, 61, 56-65.
- Meju, M.A., 2001. Geoelectromagnetic characterisation of natural resource targets: genetic models, correspondence principles and case studies. *Surveys in Geophysics* (submitted).
- Sternberg, B.K., Washburne, J.C. and Pellerin, L., 1988. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings. *Geophysics*, 53, 1459-1468.
- Ulugergerli, E.U. and Meju, M.A., 1997. Inversion of 2D magnetotelluric data using the complex singular value decomposition method. 5th SBGf, Sao Paulo. September 28-Oct. 2, 1997.



Figure 1 Area location map.

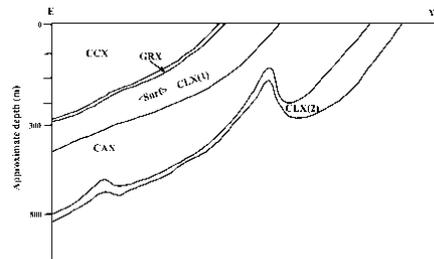


Figure 2: Working geological model for the survey area based on sparse drill-hole data (unpublished CVRD report).

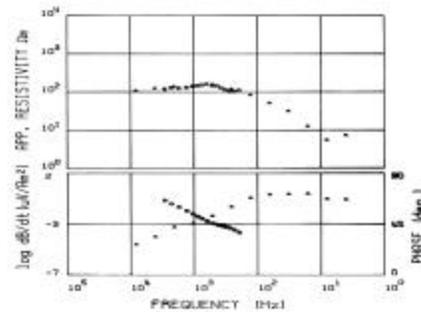


Figure 3. Sample TEM-CSAMT data. Round Symbols - TEM data.



Figure 4 Joint TEM-CSAMT inversion model.

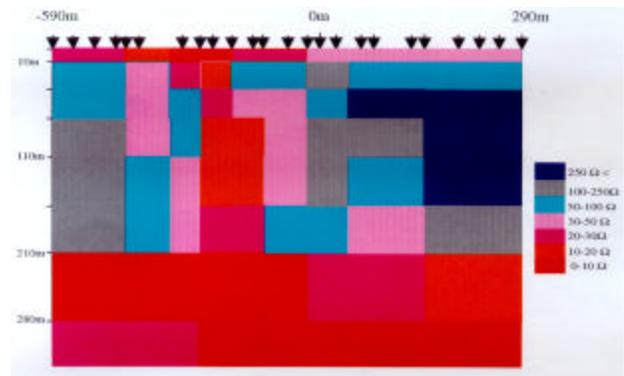


Figure 5 Preliminary 2-D inversion model for Pau-a-Pique sub-area.

## Gamaespectrometria Aplicada à Prospecção de Ouro na Folha Botuverá-SC

Luiz Fornazzari Neto<sup>(1,2)</sup>; Francisco José Fonseca Ferreira<sup>(2)</sup>; Adriane Fátima de Campos<sup>(2,3)</sup>

<sup>(1)</sup> Curso de Pós-Graduação em Geologia-UFPR; <sup>(2)</sup> Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA/UFPR;

<sup>(3)</sup> Curso de Graduação em Geologia-UFPR, Bolsista PIBIC/CNPq

### Abstract

One of the modern applications of gamma spectrometry is the identification of hydrothermally altered areas and the investigation of their relationships with mineralizing processes in a number of geological settings. The research initially investigates the gamma spectrometric responses along a flight line that crosses an area of hydrothermal alteration associated with the intrusion of a small granitoid massif, over which gold occurs within sulphide-rich quartz veins in a shear zone. In a second step, the gamma spectrometric variables were analysed in detail along the 37 flight lines over an area of 15' x 15'. The results point to at least three new exploratory targets based on the higher  $F = K \cdot U / Th$  values and on eU and K anomalies when normalized by the Th and also on the lower Th/K ratios.

### Introdução

A gamaespectrometria é tradicionalmente utilizada como apoio ao mapeamento geológico regional e à prospecção mineral. Recentemente, a transformação das contagens por segundo em concentrações de K (%), eU e eTh em ppm, tem permitido extrair informações importantes destes dados, em correspondência à integração de dados exploratórios multifonte. Uma das aplicações modernas da gamaespectrometria, aérea e terrestre, é a possibilidade de identificar áreas alteradas hidrotermalmente e explorar suas relações com os processos de mineralizantes em vários ambientes geológicos. A área selecionada situa-se na porção centro-leste do estado de Santa Catarina (Folha Botuverá – 1:50.000), compreendida entre as coordenadas 27°00' e 27°15' de latitude sul e 49°15' e 49°00' de longitude oeste (Figura 1). Nesta região encontram-se diversas ocorrências de ouro em rocha e aluviões, mapeamento geológico, dados aerogeofísicos (magnetométricos e gamaespectrométricos), geoquímica de sedimentos de corrente e concentrados de bateia, divulgados por Caldaso *et al.* (1995). Neste sentido, o presente trabalho busca avaliar o potencial do método gamaespectrométrico, a partir de dados do BARMP (1997), para localizar tratos de alteração hidrotermal vinculados à mineralizações de ouro em veios e associados com corpos granitóides e zonas de

cisalhamento, além de sugerir novos alvos exploratórios na Folha Botuverá –SC.

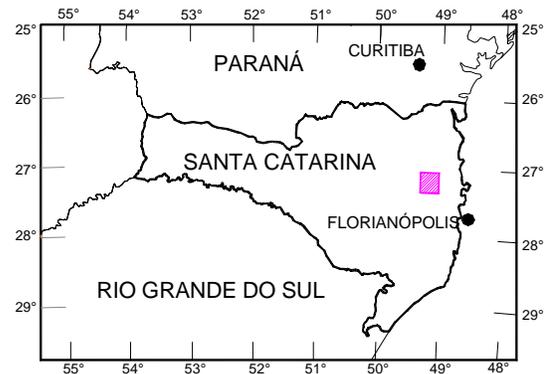


Figura 1 – Mapa de localização da área estudada.

### Contexto Geológico

A Folha Botuverá está inserida na porção central do Escudo Catarinense, envolvendo um núcleo do embasamento remobilizado (Arqueano). Afloram também um cinturão metavulcano-sedimentar do Proterozóico Inferior-Médio, com direção geral N50E (Complexo Brusque de Silva & Dias, 1981); uma cobertura Vulcano-Sedimentar (Bacia do Itajaí) e granitóides do Proterozóico Superior-Eopaleozóico (Kaul, 1976).

O Complexo Brusque na área agrupa as seguintes unidades (Caldaso *et al.*, 1995): 1) unidade vulcano-sedimentar - MVS (metabásicas porfíricas e xistos magnesianos, subordinadamente metagabros, metabasaltos finos e variolíticos, metapelitos, metarritmitos pelítico-arenosos e metacalcários); 2) unidade carbonática – MCC (metacalcários, subordinadamente metapelitos, metabásicas porfíricas e xistos magnesianos); 3) unidades siliciclásticas pelítico-arenosas – MPA1 (filitos e filitos grafitosos) e MPA2 (micaxistos e quartzitos micáceos granatíferos); 4) unidade siliciclástica areno-pelítica – MAP (metarritmitos pelítico-arenosos).

Os corpos granitóides intrudidos no Complexo Brusque, são conhecidos como granitóide Faxinal (biotita-hornblenda sienito a sieno-monzogranito, quimismo metaluminoso, alcalino, do tipo A); Suíte Valsungana/Guabiruba (sieno e monzogranitos a granodioritos, quimismo predominantemente metaluminoso a peraluminoso, calcialcalinos a alcalinos, gerados a partir de fonte mista) e fácies Indaiá (monzogranitos, sieno-granitos e



## Gamaespectrometria Aplicada à Prospecção de Ouro

granitóide Faxinal; C – filões de quartzo associados a volframita e ouro (ocorrências do Braço da Cristalina e do Russo); D – correspondente à zona anômala 5 (granitóide Valsungana) e E – vinculada à zona anômala 6.

### Resultados obtidos e discussão

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 3, 4, 5, 6 e 7. As discussões priorizaram a correlação das anomalias gamaespectrométricas com dados geológicos, pintas de Au em concentrados de bateia, zonas anômalas e áreas favoráveis para ouro apresentadas por Caldasso *et al.* (1995) para, em seguida e com base nesta correlação, sugerir novos alvos exploratórios.

A resposta gamaespectrométrica da área favorável A, a qual envolve as ocorrências do MCB e do Tigrano (Figura 7), foi estabelecida através dos perfis empilhados apresentados na Figura 3, em correspondência com o perfil geológico A-B, onde observa-se claramente incrementos da razão U/Th, do parâmetro F e das anomalias Ud e Kd. As anomalias de F, acima da média mais três desvios padrão, também estão relacionadas com baixas razões Th/K, ambas indicativas de alteração hidrotermal, verificada por ocasião da definição da assinatura gamaespectrométrica terrestre da ocorrência do MCB (Fornazzari *et al.*, neste congresso).

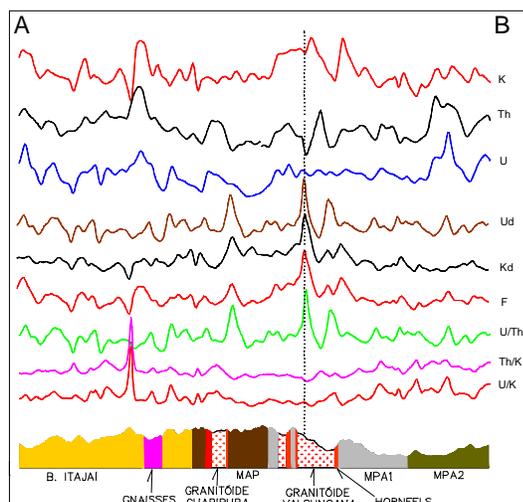


Figura 3 – Assinatura gamaespectrométrica da zona anômala A (ocorrências MCB e Tigrano).

A área favorável B, representada pelo granitóide do fácies Faxinal, não apresentou resposta indicativa de alteração hidrotermal, apesar das altas contagens de pintas de ouro em concentrados de bateia, sugerindo que os processos de mineralização devem ser distintos dos anteriores. A área favorável C não

foi avaliada em função da falta de dados (grande espaçamento das linhas de voo). A área D, de forma semelhante à área favorável B, não apresentou resposta típica das verificadas para as ocorrências MCB e Tigrano, talvez pelos motivos apresentados anteriormente, apesar da presença das zonas anômalas 4 e 5, verificando-se o mesmo comportamento para as ocorrências Gaspar Alto e Quati (6 e 7, respectivamente, Figura 7). Finalmente, na área favorável (E), foi identificado apenas um pico anômalo do parâmetro F, no centro da zona anômala 6.

Com base na assinatura das ocorrências do MCB e do Tigrano, foram propostos três novos alvos exploratórios para ouro (Figura 7), os quais devem refletir estilos semelhantes de mineralização. O primeiro alvo (F1) localiza-se na borda do granitóide Valsungana, a noroeste da área; o segundo (F2) situa-se no granitóide Guabiruba, porção centro-leste da Folha e o terceiro (F3) está hospedado na região de xistos da unidade MPA1 do Complexo Brusque e posicionado à oeste da ocorrência do Tigrano, possivelmente no prolongamento da mesma estrutura de direção E-W.

A assinatura gamaespectrométrica do alvo F1 pode ser observada na Figura 4, onde destaca-se, do mesmo modo que na Figura 3, incrementos da razão U/Th, do parâmetro F e das anomalias Ud e Kd, associadas com baixas razões Th/K, portanto indicando uma área de alteração hidrotermal. É importante ressaltar que o alvo F1 encerra duas estações anômalas de Au, além de representar os mais elevados índices do parâmetro F e as mais baixas razões Th/K de toda a área, conforme a Figura 5.

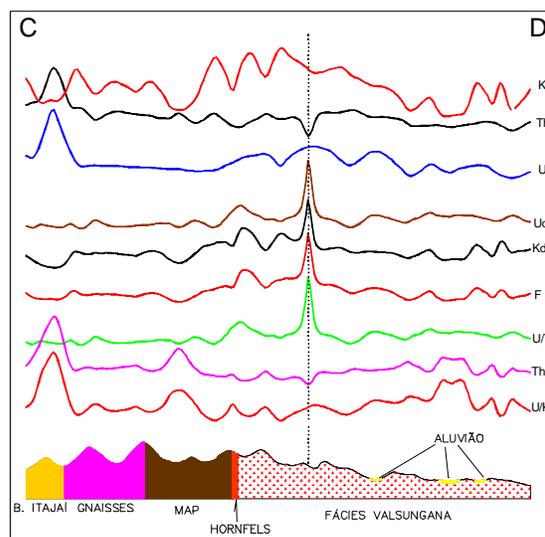


Figura 4 – Assinatura gamaespectrométrica do alvo exploratório F1.

## Gamaespectrometria Aplicada à Prospecção de Ouro

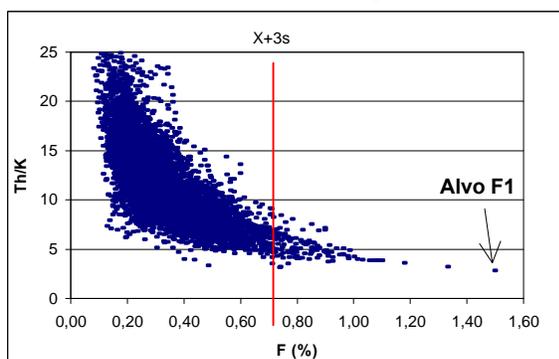


Figura 5 – Correlação entre os parâmetros Th/K e F.

A Figura 6 representa a imagem do parâmetro F sobreposta ao modelo digital do terreno (MDT), onde observa-se as anomalias correspondentes às ocorrências MCB e Tigrano (centro da área, perfil A-B), assim como os novos alvos sugeridos, F1 (extremo NW da área, perfil C-D), F2 e F3 (compare com a Figura 7). As demais anomalias indicadas na Figura 7, apesar de não terem recebido o *status* de alvos exploratórios, em função da ausência de indicativos geoquímicos e geológicos, devem também ser verificadas em campo.

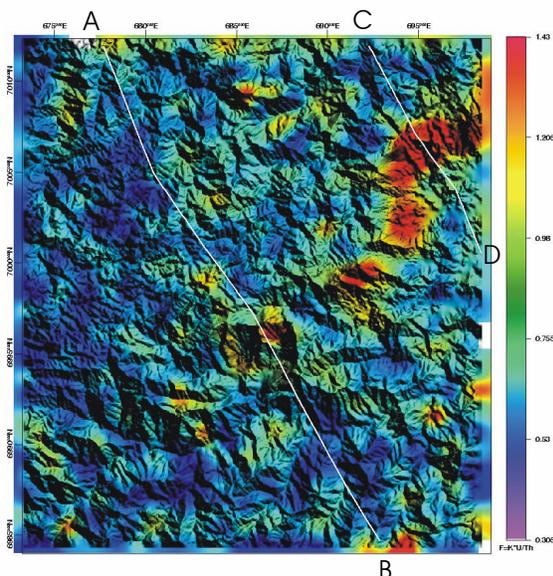


Figura 6 – Imagem do parâmetro F sobreposta ao MDT, indicando as principais anomalias.

### Conclusões

O trabalho permitiu indicar pelo menos três novos alvos exploratórios na Folha Botuverá-SC, com base na identificação de áreas de alteração hidrotermal, interpretadas pelo processamento de dados gamaespectrométricos e integração geológica.

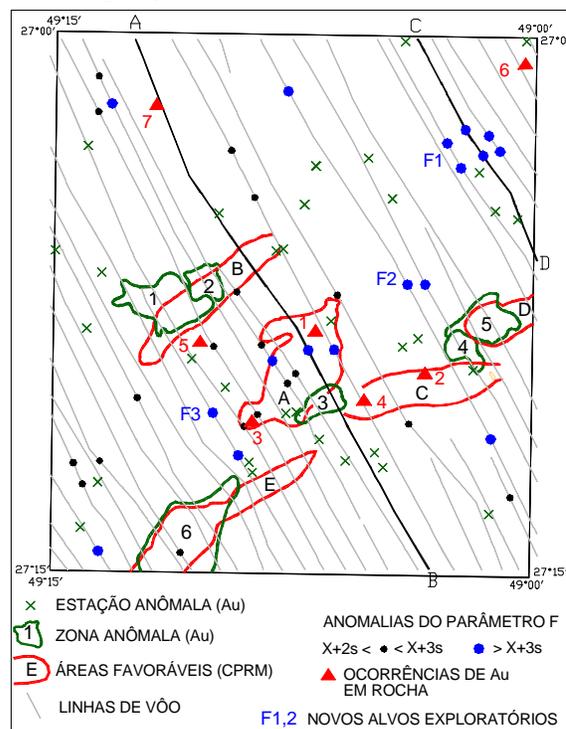


Figura 7 – Proposta de novos alvos exploratórios.

### Referências Bibliográficas

- BARMP 1997. Brazil Airborne Radiometric Mapping Project. Technical Report and Survey Atlas. A collaboration between PGW-CPRM, RJ.
- CPRM 1978. Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. Relatório Final (inédito).
- Caldasso *et al.* 1995. Geologia da Folha Botuverá (SG.22-Z-D-I-2), Estado de Santa Catarina, escala 1:50.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, MME/SMM/CPRM, 303p.
- Fornazzari Neto, L.; Ferreira, F.J.F.; Forlin, M. 2001. Assinatura Gamaespectrométrica da Ocorrência de Ouro do Carneiro Branco-SC (neste congresso).
- Gnojek, I. & Prichystal, A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, 23(4):491-502.
- Kaul, P.F.T. 1976. Projeto Brusque Serra do Tabuleiro. Brasil. Convênio DNPM/CPRM, Porto Alegre, 165p. (Relat. Inédito).
- Pires, A. C, B. 1995. Identificação Geofísica de Áreas de Alteração Hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Rev. Bras. Geoci.* São Paulo, 25(1):61-68.
- Silva, L.C. da & Dias, A.A. 1981. Projeto Timbó-Barra Velha. Porto Alegre: DNPM/CPRM, 282p (inédito).

## Gamaespectrometria da Ocorrência de Ouro do Morro do Carneiro Branco-SC

Luiz Fornazzari Neto<sup>(1,2)</sup>; Francisco José Fonseca Ferreira<sup>(2)</sup>; Maximilian Forlin<sup>(2)</sup>; Sidnei Pires Rostirolla<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Curso de Pós-Graduação em Geologia-UFPR; <sup>(2)</sup> Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA/UFPR;

<sup>(3)</sup> Departamento de Geologia, UFPR

### Abstract

One of the modern applications of gamma spectrometry is the identification of hydrothermally altered areas and the investigation of their relationships with mineralizing processes in a number of geological settings. The research delimits the terrain's gamma spectrometric signature in areas over which gold occurs. The gold occurrences are characterized by sulphide-rich quartz veins of average thickness of 2 m, with average grades of 6 g/ton (locally up to 17 g/ton over a shear zone associated with the intrusion of a small granitoid body. The terrain's gamma spectrometric signature denotes high U and Th grades, low Th/k ratios and anomalous  $F = K.U/Th$  values. Such geophysical behavior reflects a hydrothermal alteration zone characterized by intense sericitization of potassic feldspars.

### Introdução

A gamaespectrometria é tradicionalmente utilizada como apoio ao mapeamento geológico regional e à prospecção mineral. Recentemente, a introdução de levantamentos de alta resolução e a transformação das contagens por segundo em concentrações de K (%), eU e eTh em ppm, tem permitido extrair informações valiosas destes dados. Uma das aplicações da gamaespectrometria, aérea e terrestre, é a possibilidade de identificar áreas alteradas hidrotermalmente e, em consequência, explorar suas relações com processos de mineralização de ouro e prata, além de metais base (Cu-Pb-Zn), em vários ambientes geológicos. Neste sentido, o presente trabalho visa definir a assinatura gamaespectrométrica terrestre da ocorrência de ouro e prata do Morro do Carneiro Branco (MCB), com o objetivo de estabelecer relações com os dados aéreos, permitindo desta forma sugerir novos alvos exploratórios no âmbito da Folha Botuverá-SC (Fornazzari *et al.*, neste congresso). A ocorrência pesquisada situa-se na porção central da mencionada quadrícula (1:50.000), a qual é limitada pelas coordenadas 27°00' e 27°15' de latitude sul e 49°15' e 49°00' de longitude oeste (Figura 1).

O trabalho envolveu um levantamento terrestre, assim como o processamento dos dados e a integração com informações geológicas e geoquímicas da região do MCB, além da descrição de seções delgadas.

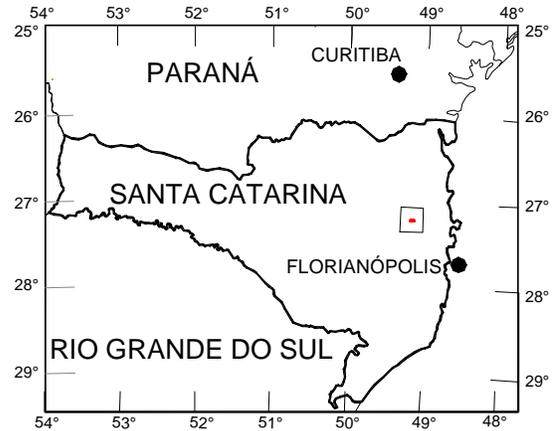


Figura 1 – Mapa de localização da área do MCB

### Geologia da Região do Morro do Carneiro Branco

A região do Morro do Carneiro Branco situa-se no contexto da Folha Botuverá, cuja geologia é resumidamente descrita em Fornazzari *et al.* (neste congresso).

O mapa geológico da região do MCB (Figura 2) foi organizado a partir de informações coletadas na década de 80 e cedidas pela empresa de mineração Novo Prisma Ltda (Ribas, 1991). Localizada na borda setentrional do granitóide Lajeado Baixo do fácies Valsungana (Caldasso *et al.*, 1995), a região envolve metapelitos (xistos) e metarcósios líticos pertencentes ao Complexo Brusque (Proterozóico Inferior-Médio), corpos granitóides do Proterozóico Superior e *hornfels*.

O domínio das rochas metapelíticas agrupa sericita-xistos, sericita-quartzo xistos, micaxistos e mica-quartzo xistos (com biotita e/ou muscovita), xistos grafitosos, entre outros. Apresentam-se finamente foliados, granulação fina, as vezes bandados com intercalações milimétricas de quartzo. O metamorfismo regional atingiu a fácies xisto verde. Os metapelitos são extremamente deformados, dobrados e cataclados, refletindo a forte tectônica plástica e rígida impressa à região. Nas zonas de falha que cortam a área, com direções gerais E-W e N45E, os metapelitos exibem concentrações de óxidos de ferro disseminadas na rocha e em fraturas, além de vênulas de quartzo hidrotermal cobertas por uma película de manganês. Em alguns pontos ocorrem níveis de clorita-quartzo xistos finamente foliados, com até 20% de pirita estratiforme e disseminada,

## Assinatura Gamaespectrométrica

acompanhada por injeções de quartzo hidrotermal, as vezes com sulfeto disseminado.

Os metarcósios líticos constituem metassedimentos de origem detrítica de granulação grossa, com matriz rica em quartzo e fenocristais nodulares subarredondados de até 3cm de diâmetro, além de porções ricas em clorita e outras em biotita. Ocorrem vênulas de quartzo, possivelmente de origem hidrotermal, com 15 cm de espessura, exibindo pirita disseminada em algumas porções. Os contatos com as demais litologias são difusos e pouco nítidos, dificultando sua cartografia.

Os metapelitos e metarcóseos encontram-se intensamente afetados por metamorfismo termal relacionado às intrusões graníticas presentes na área, caracterizando importantes zonas de *hornfels*. Estas, no geral, apresentam-se intensamente sericitizadas e muscovitizadas, de granulação fina a média com a xistosidade preservada e, em alguns locais, graisenizadas. Localmente atingiram o fácies anfíbolito.

Quanto aos granitóides, além do fácies Valsungana, o qual predomina na área, também ocorrem pequenos *stocks* atribuídos ao fácies Guabiruba (Ribas, 1991)

### Ocorrências de Ouro da Região do MCB

A região do MCB encerra diversas ocorrências de ouro, as quais configuram pelo menos 8 alvos exploratórios (Figura 3), parcialmente avaliados por algumas empresas de mineração e distribuídos em uma área aproximada de 800 ha.

O alvo principal (MCB), motivo do presente estudo, é definido por um conjunto de veios de quartzo sulfetados, dispostos segundo uma zona de cisalhamento com direção geral N75°-85°W, a qual intercepta um pequeno corpo granitóide classificado como micro-monzonito, através de estudo petrológico preliminar (Vasconcelos, 1999), compatível com o fácies Valsungana de Caldasso *et al.* (1995). Esta rocha apresenta feições de alteração hidrotermal, caracterizada por uma intensa sericitização dos feldspatos potássicos (microclínio e oligoclásio).

Na zona de cisalhamento os veios estão encaixados em um pacote delgado, deformado e concordante, de clorita-biotita-muscovita-quartzo xistos e muscovita-quartzo xistos, classificados como milonitos, onde observa-se os pares SS e SC de transposição, indicando movimento lateral direito.

A espessura média dos veios mineralizados é de 2m, podendo atingir até 4,5m, com mergulho de 45° para sul. Aflorando por cerca de 200m, exibem teores médios de 6g/t de ouro, podendo atingir pontualmente

até 17g/t, e 15g/t de prata (Gold Standard Minas S.A., comunicação pessoal), além de cobre e arsênio em menores proporções.

Especula-se uma relação genética dos veios com os granitóides Valsungana/Guabiruba, caracterizando um sistema mesotermal posicionado em zona de cúpula (Caldasso *et al.*, 1995), além de acentuado controle estrutural, apesar da carência de estudos.

### Gamaespectrometria

O levantamento geofísico terrestre foi realizado através de um gamaespectrômetro de 512 canais (GS-512, fabricado pela Scintrex/Geofyzika), procedendo-se leituras em 160 pontos, espaçadas de 50m e 25m, ao longo dos acessos existentes (Figura 4), incluindo 8 determinações nas encaixantes imediatas dos veios quartzo-auríferos, onde se dispunha de dados geoquímicos de amostras de canal (Figura 5).

As leituras gamaespectrométricas foram tomadas em contagens por segundo e automaticamente transformadas em concentrações de K (%) e de eU e eTh em ppm, com base em procedimento de calibração realizado no Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD, da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Os resultados finais são apresentados após a remoção do *background* atmosférico para cada canal, ou seja: K(%) = 0; U = 0.1 ppm e Th = 1.8 ppm, realizada sobre lâmina d'água superior a 2m.

Além dos dados destes três canais, foram calculadas as razões U/Th, Th/K e U/K, além do parâmetro  $F = K*U/Th$  (Gnojek & Prichystal, 1985). Os valores da média (x), do desvio padrão (s), mínimo, máximo e coeficiente de variação (CV), podem ser visualizados na Tabela 1. Nota-se que os coeficientes de variação são menores que 1, admitindo-se uma distribuição normal para o conjunto de dados.

	x	s	x+1s	Min	Max	CV
K	3,08	1,04	4,12	1,1	6,2	0,34
U	3,20	1,49	4,69	0,5	9,7	0,47
TH	17,85	7,50	25,35	4,2	42,3	0,42
F	0,59	0,32	0,91	0,11	1,737	0,54
U/TH	0,19	0,08	0,27	0,05	0,47	0,41
TH/K	6,25	2,97	9,22	2,19	17,64	0,47
U/K	1,12	0,60	1,72	0,24	3,54	0,53

Tabela 1 – Estatística básica das variáveis gamaespectrométricas.

A análise destas relações gamaespectrométricas foi norteada por alguns resultados da literatura internacional, obtidos através de testes em áreas mineralizadas e seu relacionamento com o quimismo

## Assinatura Gamaespectrométrica

das rochas envolvidas. Constatou-se que em zonas de alteração hidrotermal associadas à mineralizações de ouro em ambiente similar ao da área em questão, ocorre um enriquecimento de K e U em detrimento do Th, o qual pode, em alguns casos, até ser depletado (Dickson & Scott 1997). Estas relações também são evidenciadas pelo parâmetro  $F = K \cdot U / Th$ .

	GAMAESPECTROMETRIA							GEOQUÍMICA		
	K %	U ppm	Th ppm	Th/K	U/K	U/Th Ppm	F	K %	Au ppb	Ag ppm
1	4,2	4,2	27,2	6,48	1	0,15	0,65	1,9	28	4,1
2	5,7	6,6	25,3	4,44	1,16	0,26	1,49	3,7	8	1,5
3	4	6,2	24,6	6,15	1,55	0,25	1,0	2,9	15	1,5
4	5,1	5,1	30,7	6,02	1	0,17	0,85	2,7	5	1,5
5	4,7	4,1	18,9	4,02	0,87	0,22	1,02	3,6	1003	1,5
6	4,2	5	17,4	4,14	1,19	0,29	1,21	3,6	1003	1,5
7	3,6	4,5	31,4	8,72	1,25	0,14	0,5	1,1	1722	15
8	6,2	3,7	22,5	3,63	0,6	0,16	1,02	NÃO ANALISADO		

Tabela 2 – Resultados geofísicos e geoquímicos do veio e das encaixantes do MCB.

### Resultados Obtidos

Os resultados obtidos permitiram determinar a assinatura gamaespectrométrica da ocorrência do MCB, cuja representação gráfica pode ser observada nas figuras 6, 7 e 8, enquanto a Tabela 2 exibe os dados geofísicos e geoquímicos dos veios e de suas encaixantes imediatas (Figura 5). Esta assinatura é caracterizada por teores de potássio e urânio acima da média (Figura 6). Apesar da razão Th/K não evidenciar claramente, para algumas amostras, um enriquecimento expressivo de K em relação ao Th (Figura 7), este comportamento sugere que o tório também pode ter migrado, juntamente com o potássio e o urânio (Figura 8), durante o processo de alteração hidrotermal, apesar do antagonismo entre tais elementos (Efimov, 1978 *apud* Gnojek & Prichystal, 1985). Porém, de acordo com Dickson & Scoott (1997), este comportamento, apesar de atípico, foi verificado em algumas mineralizações deste tipo. O parâmetro F, como esperado, apresentou valores elevados nas encaixantes imediatas dos veios mineralizados.

Os teores de K (%) obtidos por gamaespectrometria e por análises geoquímicas de amostras de canais dos veios, pelo método de digestão multiácida/ICP (Figura 9), mostra que há uma certa correlação qualitativa entre estes métodos. Os teores geoquímicos são inferiores aos gamaespectrométricos, possivelmente porque a amostragem dos canais representa os teores médios do segmento amostrado, enquanto que as leituras radiométricas são pontuais. Estes teores elevados de potássio nos milonitos ao longo da zona de

cisalhamento, são condizentes com a intensa sericitização e muscovitização verificadas em campo e em seções delgadas. Cabe ressaltar que assinatura semelhante também foi verificada por estudo gamaespectrométrico aéreo no conjunto da Folha Botuverá (Fornazzari *et al.*, neste congresso).

### Conclusões

A assinatura gamaespectrométrica da ocorrência de ouro do MCB foi caracterizada por enriquecimentos de K, U e do parâmetro F e por relativamente baixas razões Th/K. Tal comportamento é interpretado pela intensa sericitização dos milonitos na zona de cisalhamento, junto aos veios e no granitóide encaixante. O processo hidrotermal é caracterizado por uma zona de alteração fílica e pervasiva, em correspondência com este tipo de mineralização em várias partes do mundo. Os resultados desta pesquisa apontam para a necessidade de incrementar este tipo de estudo no Brasil, em depósitos minerais com bons controles geológico e geoquímico, no sentido de não apenas determinar suas assinaturas gamaespectrométricas, mas, sobretudo, sugerir novos alvos exploratórios.

### Referências Bibliográficas

- Caldasso *et al.* 1995. Geologia da Folha Botuverá (SG.22-Z-D-I-2), Estado de Santa Catarina, Escala 1:50.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, MME/SMM/CPRM, 303p.
- Dickson, B.L. & Scoott, K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. *In: Airborne Magnetic and Radiometric Surveys*, AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17(2):187-200.
- Fornazzari Neto, L.; Ferreira, F.J.F.; Campos, A.F. 2001. Gamaespectrometria Aplicada à Prospecção de Ouro na Folha Botuverá-SC (neste congresso).
- Gnojek, I. & Prichystal, A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, 23(4), 491-502.
- Ribas, A.U. 1991. Relatório Parcial de Pesquisa – Área do Morro do Carneiro Branco. DNPM, processo N° 815.097/88, GEOCON – Geologia e Consultoria Ltda.
- Vasconcellos, E.G. 1999. Análise Petrográfica de Rochas (MCB), Gold Standard Minas S. A. (inédito).

## Assinatura Gamaespectrométrica

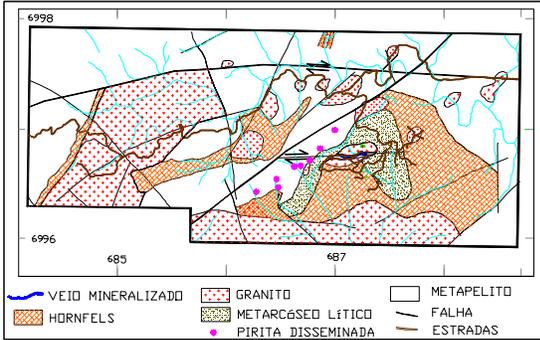


Figura 2 – Mapa geológico da região do MCB

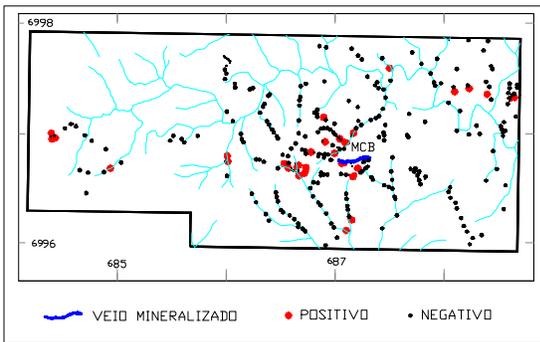


Figura 3 – Mapa de amostragem de ouro em rocha

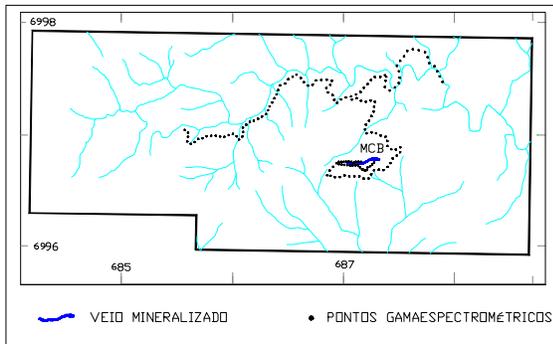


Figura 4 – Mapa de pontos gamaespectrométricos

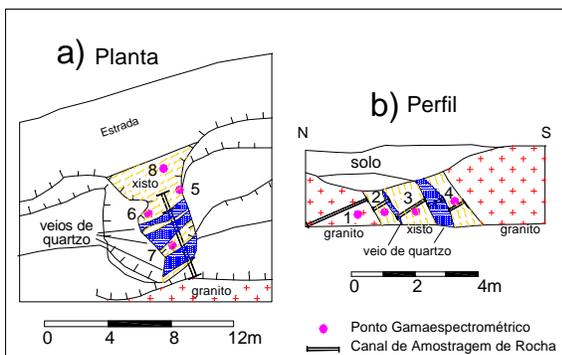


Figura 5 – Croquis de amostragem de canais e pontos de leitura gamaespectrométrica

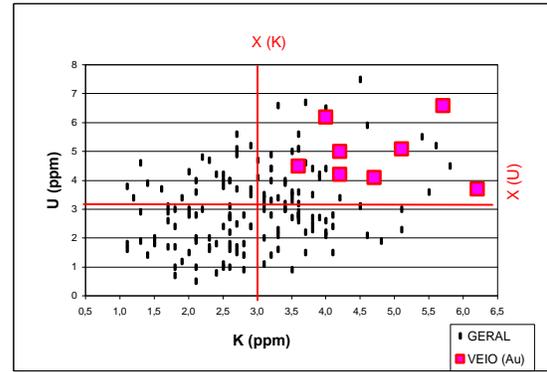


Figura 6 - Correlação gamaespectrométrica entre U e K

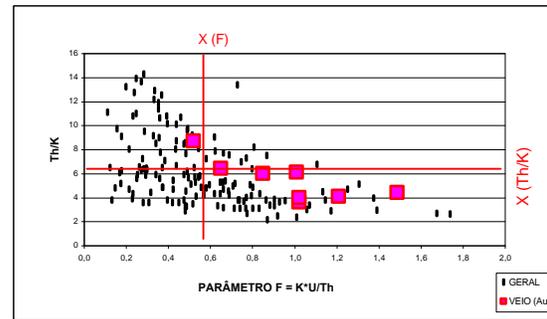


Figura 7 - Correlação gamaespectrométrica entre Th/K e F

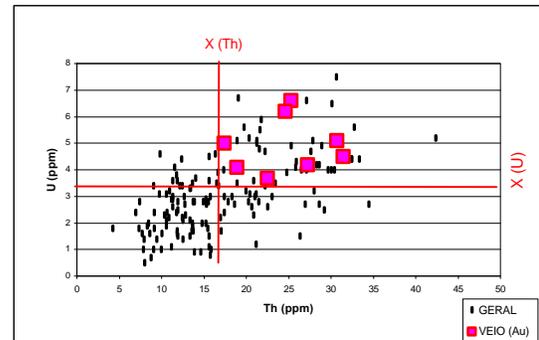


Figura 8 - Correlação gamaespectrométrica entre U e Th

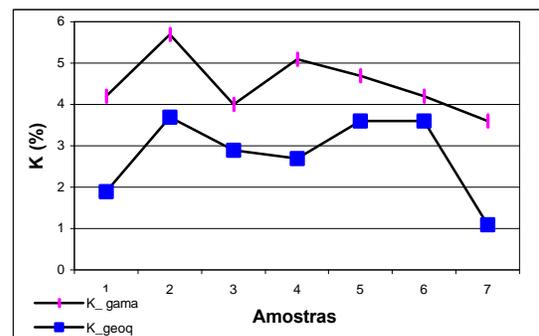


Figura 9 - Resultados de K obtidos por gama e geoquímica



## GEOPHYSICAL SIGNATURES OF LODE Au-QUARTZ VEIN TYPE DEPOSITS RELATED TO LAVRAS DO SUL INTRUSIVE COMPLEX (RS, Brazil)

Adelir J. Strieder <sup>(1)</sup>; Francisco J.F. Ferreira <sup>(2)</sup>; Sérgio A. Buffon <sup>(1)</sup>, Maximilian Forlin <sup>(2)</sup>, and Pablo S. Palma <sup>(1)</sup>. (1) Labor. Modelagem Geológica, MODELAGE-UFRGS, Porto Alegre – RS - Brazil  
(2) Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA-UFPR, Curitiba – PR - Brazil

### Abstract

The Lavras do Sul Intrusive Complex (CILS, RS, Brazil) is a shoshonite- to alkaline type intrusion and shows a large number of lode Au-quartz vein deposits related to expressive hydrothermal alteration zones. Two distinctive hydrothermal zones type were recognized in the CILS: i) Aurora type hydrothermal zones and ii) Valdo Teixeira type hydrothermal zone. The main composition of these hydrothermal zones differs in that they present amphibole and sericite, respectively. The two types of hydrothermal alteration zones show contrasting geophysical signature for gamma-ray spectrometry and magnetometry: i) Aurora type hydrothermal zone shows lower gamma-ray emission (CT, K, U, Th), and higher magnetic intensity than country non-hydrothermally altered granite; while ii) Valdo Teixeira one shows higher gamma-ray emission (CT, K, U, Th), and lower magnetic intensity than country non-hydrothermally altered granite.

**Key words:** geophysical signatures, hydrothermal alteration, Au-quartz veins, granitic intrusion

### Introduction

The Lavras do Sul Intrusive Complex (CILS) is a multiphase intrusion located in the western part of the Sul-riograndense Shield (Figure 01). It was characterized, in its actual configuration, by Gastal (1997). The CILS is composed by a range of rock types: from monzodiorite and quartz-monzodiorites, through granodiorite and monzogranites, to sieno and k-feldspar granites; these rock types are arranged in a zoned structure, but mafic rocks are placed in the NNE and northern part of the CILS (Figure 01). The CILS is intruded into a volcano-sedimentary sequence (Hilário Formation.) and into granite-gneisses (Cambai Complex). These rock types are well-defined through regional aerogamaspectrometric data processing (Gastal *et al.*, 1999).

The CILS shows a large number of lode Au-quartz vein deposits related to expressive hydrothermal alteration zones (e.g.: Goñi, 1961; Mexias *et al.*, 1990a, 1990b). The ore composition shows some variation according the radially disposed fracture set that control lode veins (Andrade &

Strieder, 1997). General characteristics of the CILS (shoshonite to alkaline granitic intrusion) and the mineralization (ore composition, hydrothermal alteration, etc...) permitted to assign these ore occurrences as related to Climax type intrusions (Andrade *et al.* 1998). But, it is to be realized that CILS has not any more its root, eroded by subsequent processes.

Airborne gamma-ray spectrometric data processing for hydrothermal zones related to granitic intrusions (Dickson & Scoot 1997) did not applied in a good way in the lode quartz veins related to CILS, as one can expect. Fieldwork data processing, on other hand, pointed out some significant hydrothermal differences according the fracture zone structures and highlighted geophysical implications for ore exploration. Then, the aim of this paper is to present contrasting geophysical signature for lode Au-quartz vein deposits related to CILS.

### Hydrothermal alteration zone types in the CILS

Fieldwork and petrography revealed two basic types of hydrothermal zones and quartz veins controlled by fracture zones around the CILS:

1) Aurora type hydrothermal zones: hydrothermal minerals of this zone are mainly amphibole (hornblende !?), calcite, quartz and chalcedony, pyrite, calcopyrite, magnetite, galena and rare sphalerite;

2) Valdo Teixeira type hydrothermal zones: hydrothermal minerals of this zone are mainly sericite, quartz, pyrite and rare galena.

The Aurora type hydrothermal zone is variably overprinted by Valdo Teixeira type one. Some occurrences of Valdo Teixeira type hydrothermal zone show higher amounts of galena, but Cu-bearing minerals are always absent. Preliminary evaluation of these hydrothermal alteration zones show that Aurora type represent a mesothermal mineralization phase; it is overprinted by Valdo Teixeira type, that represents decreasing temperature and changing fluid composition mineralization phase (epithermal one).

## GEOPHYSICAL SIGNATURE

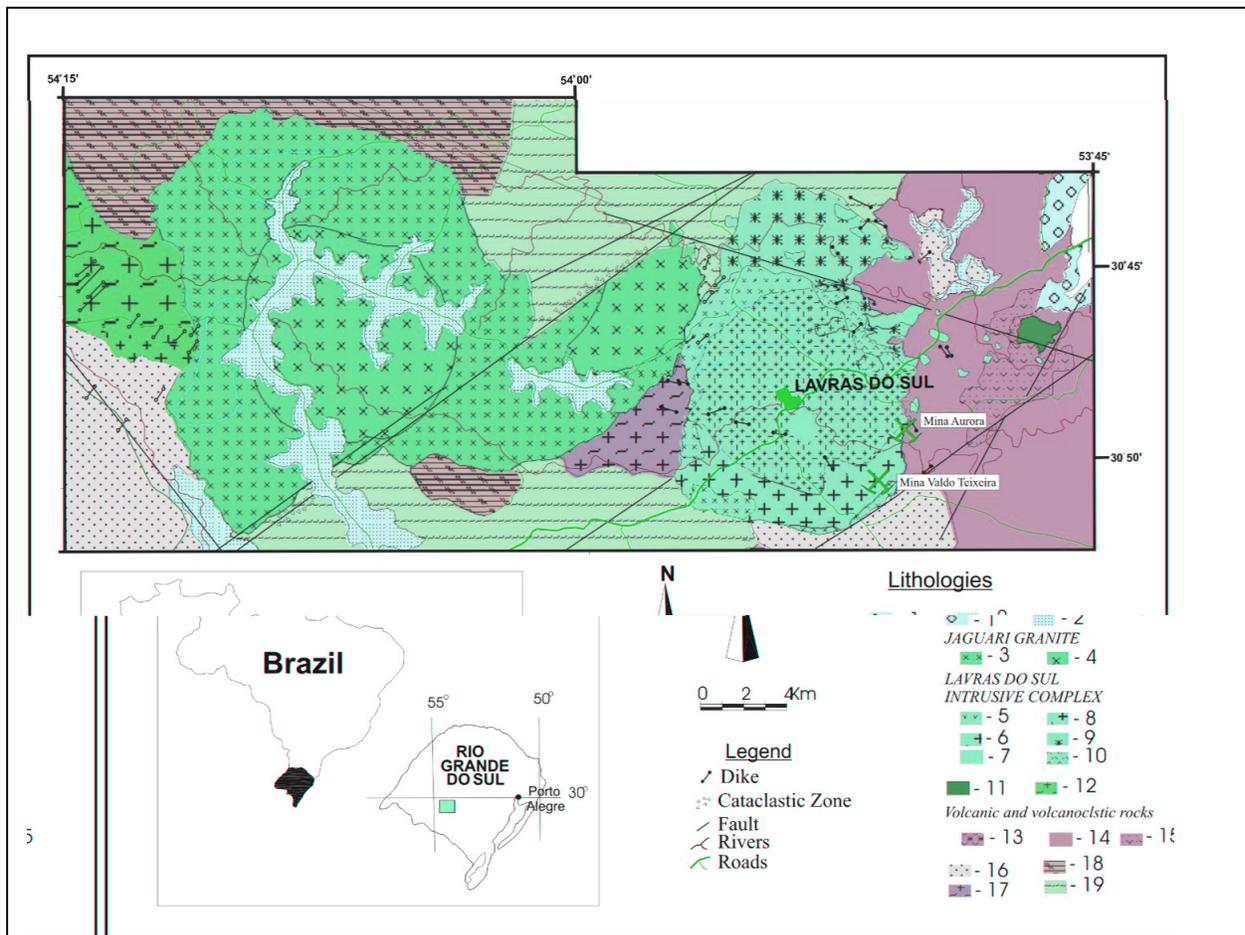


Figure 01 – Geological map of the CILS and Jaguari Granite (Gastal, 1997). Legend: 1) Santa Bárbara Fm.; 2) Cenozoic and Gondwanic sedimentary cover; 3) Sienogranite; 4) Monzogranite; 5) Pertita granite; 6) Sienogranite; 7) Porphyric quartz monzonite; 8) Granodiorite to monzogranite; 9) Quartz monzonite and monzonite; 10) Arroio do Jaques ortopirox. bearing monzodiorite; 11) Estrela granite; 12) Santa Rita monzogranite; 13) Latitic flows and breccias; 14) Andesitic flows and pyroclastic rocks; 15) epiclastic rocks; 16) Neoproterozoic cover (Maricá Fm. and Ibaré phylites); 17) Fazenda do Posto granodiorite; 18) Metamorphosed and deformed volcano-sedimentary sequences and mafic-ultramafic complexes; 19) Granite-gneissic complexes (Ortometamorphic Imbicui Suite).

### Geophysical signature of the hydrothermal zones

The compositional features of the both type of hydrothermal zones point for distinctive geophysical signature, depending on selected method. Then, taking into account composition of the hydrothermal zones and the basic principles of some geophysical methods it was possible to select the developed two types of lode Au-quartz veins (Aurora and Valdo Teixeira) and also the geophysical methods to reveal such distinctive pattern.

The selected geophysical methods were: gamma-ray spectrometry and magnetometry. The geophysical field survey was conducted in three stages and used a sampling 150 x 25 m grid. The equipments include a GRS-500/Scintrex spectrometer (differential gamma ray) with energy windows between 0.40-2.79 MeV and a GS-512 gamma ray spectrometer (Scintrex/Geofyzika), with 512 operation channel in range of 0.1 to 3 MeV, which was calibrated at *Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear (IRD-CNEN)*. For this paper, just the GS-512

## GEOPHYSICAL SIGNATURE

measurements are presented. The magnetometer/gradiometer (GSM-19 Overhauser Terraplus) measured total magnetic field and vertical gradient at the same stations. The measurement stations were determined with a DGPS (Garmin 100 SRV-II).

The Aurora type hydrothermal zone showed lower radiometric emission than the country granite for each of gamma channel (CT, K, Th, U), as can be seen in Figure 02. The magnetic intensity of the Aurora type hydrothermal zone, however, is higher than the country CILS granite. These signatures show that mineralization processes carried out the radioactive elements (mainly K), while enabled the crystallization of amphibole, magnetite, pyrite, calcopyrite and galena.

The Valdo Teixeira type hydrothermal zone, on the other hand, showed inverse geophysical signatures in respect to Aurora one (Figure 03). The gamma-ray emission in the Valdo Teixeira type hydrothermal zone is higher than in the country monzo to sienogranite; total magnetic field in this hydrothermal zone is lower than the country granite. These geophysical signatures are the result of a mineralization process that concentrated K in sericite and breakdown the magnetite into pyrite.

### Conclusions

The lode Au-quartz veins deposits associated with CILS (Lavras do Sul, RS, Brazil) show two different hydrothermal zones: Aurora type and Valdo Teixeira type. They represent a multistage mineralization process, from high temperature (mesothermal Aurora type) to lower temperature (epithermal Valdo Teixeira type) conditions. The two types of hydrothermal alteration zones show contrasting geophysical signature for gamaspectrometry gamma-ray spectrometry and magnetometry. Aurora type hydrothermal zone shows lower radiometric emissions and higher magnetic intensity related to the country granite, while Valdo Teixeira one shows higher radiometric emission and lower magnetic intensity than the country granite.

### References

Andrade, M. S ; Strieder, A.J, 1997 - Análise de fotolineamentos aplicada à intrusões de Lavras do Sul e Jaguari: ênfase no controle de mineralizações do prospecto de Volta Grande (RS). In Resumo,

- Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. 6., 371-372 Pirenópolis (GO).
- Andrade, M.S.; Strieder, A.J.; Gastal, M.C.P. 1998 Controle geotectônico, magmático e estrural das ocorrências minerais de Cu-Au na região de Lavras do Sul(RS). XL Congresso Brasileiro de Geologia. Anais, BH, SBG-MG, pg 132.
- Dickson, B. L., & Scoot, K. M.. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. AGSO journal of Australian Geology & Geophysics, 17(2), 187-200.
- Gastal, M.C.P. 1997- Suíte Saibro, RS: Avaliação de um modelo petrográfico – Curso de Pós-Graduação em Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese Doutorado. Porto Alegre, 365p.
- Gastal, M. C. P., Strieder, A. J. and Ferreira, F. J.. 1999. Aspectos do Complexo Granítico Lavras do Sul-RS, reinterpretação das fácies graníticas e a gênese de depósitos de Cu-Au. In Boletim de Resumo. Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados I. Gramado.
- Gõni, J.C. 1961– O Rapakivi Lavras, jazidas metalíferas associadas, Rio Grande do Sul Brasil. Bol. Escola de Geologia, UFRGS, Porto Alegre, 7: 91p.
- Mexias, A.S.; Formoso, M.L.L; Meunier, A. ; Beaufort, D. 1990a– O sistema Hidrotermal Fóssil de Volta Grande – Lavras do Sul/RS.- Parte I – Petrografia do Hidrotermalismo. Geochim. Brasil, 4(2):139-157.
- Mexias, A.S.; Formoso, M.L.L; Meunier, A. ; Beaufort, D. 1990b– O sistema Hidrotermal Fóssil de Volta Grande – Lavras do Sul/RS.- Parte II – Petrografia do Hidrotermalismo. Geochim. Brasil, 4(2):159-174.

### Acknowledgments

The authors thank **FAPERGS** (Proc. N° 96/0383-2), **CNPq-PADCT** (Proc. N° 13.2047/1998-5) and **CNPq-PADCT** (Proc. N° 62.0155/97-3 GTM/UFPR) for research grants.

## GEOPHYSICAL SIGNATURE

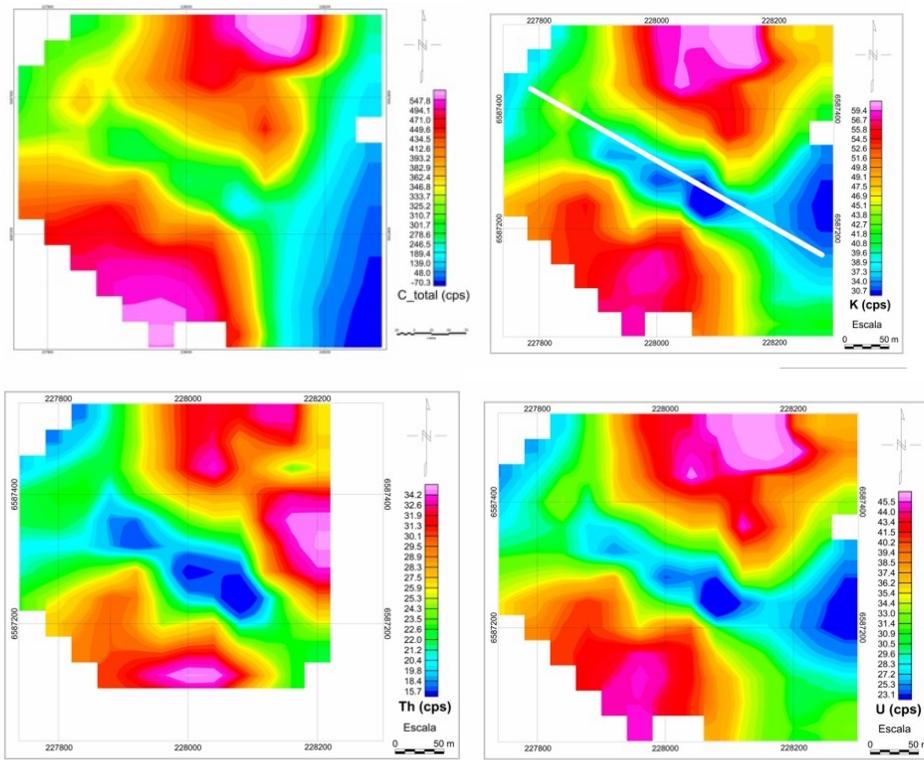


Figure 02 – Gamaspectrometric maps for Aurora type hydrothermal zone (CILS, Lavras do Sul, RS).

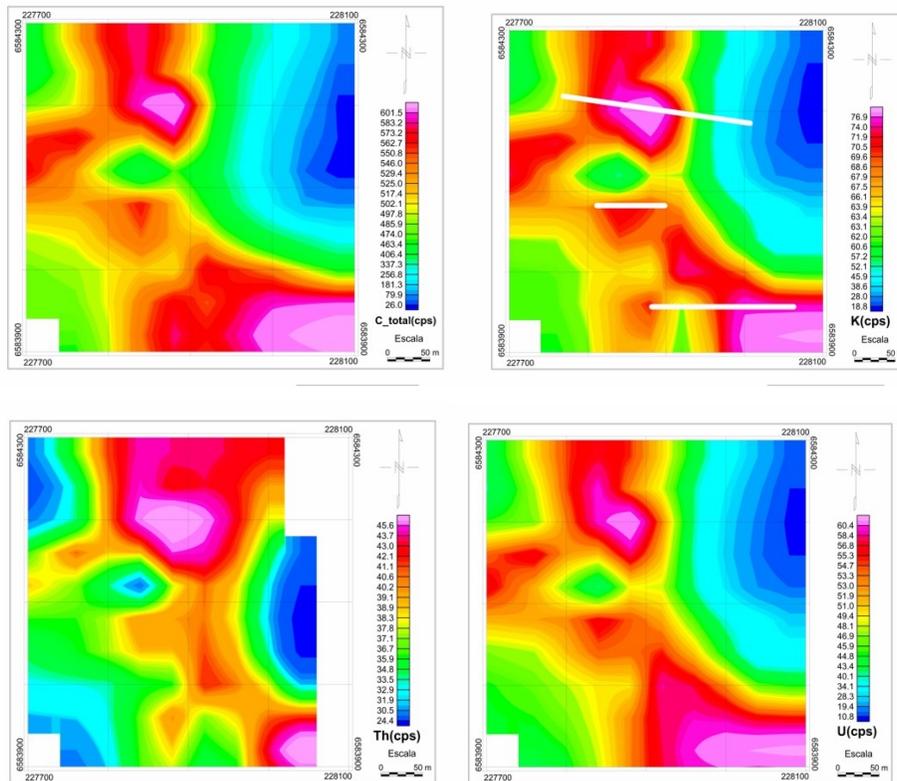


Figure 03 – Gamaspectrometric maps for Valdo Teixeira type hydrothermal zone (CILS, Lavras do Sul, RS).



## Gravity Surveying Used for Chromite Prospecting in Amapa; Special Processing Requirements.

William A. Sauck, Western Michigan University, Kalamazoo, MI, USA; formerly at DGf, CG, UFPa

### Abstract

This is a case history of a detailed gravity survey on a nominal 40x40 meter grid over an area of 1.5 by 2 km in a remote part of Amapa, Brazil. The survey consisted of more than 1800 gravimeter stations. The geodetic position of the site was not accurately known at the time of the survey (1984-1985), and elevations were known only within the survey area at the grid points. Because of the relative positioning information, arbitrary latitudes were assigned. The remoteness of the site required a minimum of one day's travel from the nearest absolute base station (Belém), and thus an accurate transfer of gravity datum was not feasible. As a result, an arbitrary base station observed gravity was assigned to the field base. With the large data set, a statistical regression of Free Air Anomaly against station elevation gave:  $FAA = 11.715 + 0.086(ELEV.)$  This slope was then used in the expression:  $0.0419(Density) = 0.086 \text{ mGal/m}$ . Solving for Density gave  $2.05 \text{ gm/cm}^3$ . A density of 2.00 was used for the material above datum in the Bouguer correction. Because the local topographic relief was 75 meters, corrections for near topography were made, using a modification of the Kane method of vertical square prisms with dimensions equal to the grid size (40 m). This was done with a Fortran routine programmed for an early model PC. The resulting Complete Bouguer Anomaly map showed a complex high centered in the prospect area. Individual gravity highs could be caused by chromite concentrations, but also by a number of geologic conditions such as: incomplete serpentinization, young unaltered gabbro and diabase intrusions, silicification, or lesser depths of weathering.

### Introduction

In 1984 and 1985, the author was hired to conduct a gravity survey on a chromite prospect which had been discovered by a regional soil geochemistry reconnaissance survey. The area is located about 80 km NW of Porto Santanain what was at the time the Federal Territory of Amapa. Approximate coordinates are  $00^\circ, 20' \text{ N}$  latitude and  $51^\circ, 45' \text{ W}$  longitude. An E-W baseline had been established, and transverse lines extending up to 850 meters N and S had also been cut and surveyed topographically at 40 m intervals. Transverse lines were every 40 m along 2000 m of the baseline. The area was pristine tropical rain forest and contained several perennial

streams. Topographic elevation ranged from about 100 to 175 meters ASL within the surveyed rectangle (Figure 1). The object of the survey was to locate specific bodies of chromitite (rock rich in chromite).

### Geologic Setting

The region is part of the Precambrian Shield and the specific research area is designated as an Archean volcano-sedimentary sequence on the Geologic Map of Brazil (DNPM, 1981). The host rocks are ultrabasic rocks which occur in an approximately E-W trending belt having an extent of about 15 km and a N-S width of 1 to 1.5 km. Outcrops are rare in the region and within this pilot area, only one outcrop of about 6 m by 4 m was observed. Other lithologies known within and near the pilot area are: mica schist, quartzite, iron formation, and micro-gabbro or diabase (unmetamorphosed). Blocks of hard laterite or canga are common in certain parts of the area. Subsequent to emplacement and probable serpentinization, these ultrabasic rocks were strongly metamorphosed in the Transamazonian cycle. Chromitite appears on the surface as rounded blocks ranging in size from 10 cm to 10 meters in diameter. Prior to exploratory drilling, mapping of structure was nearly impossible. If these ultrabasic rocks were intensely serpentinized, then using the New Caledonian occurrences as models, one can expect extreme deformation within these rocks, and deformation which is totally discordant with structures outside the ultrabasic belt.

### Gravimeters and Survey Techniques

The gravimeter used for most of the work was the LaCoste-Romberg G-628, a precision geodetic model which has thermostatic temperature control (but which requires a 12 volt battery attached day and night during the entire survey). The instrument used on one trip was the Worden Prospector, #967, manufactured by Texas Instruments (and requires only 2 small 1.5 volt AA batteries per day to provide internal lighting). Each has advantages and disadvantages for this type of survey, and both have approximately the same precision (0.01 mgal). The L & R is heavier because of the battery. It requires a motor generator and charger, or source of 110 v or 12 v power to recharge batteries every day. However, it is more robust because it has a latch to secure the mechanism during transit. Also, the reading of the dial is easier and less prone to human error. The

## Gravity in Amapa

Worden must be treated more carefully during transit, and the vernier-type dial can cause reading errors when the operator is tired or in poor lighting conditions. The Worden has considerable long-term drift while the L&R does not.

An arbitrary principal base station was chosen at the base line. Other secondary bases were then established by short loops at various locations along the base line. The survey was done using closed loops, returning to a base station on average every two hours. Thus, the drift correction included the tidal variations. The survey proceeded with one or two assistants to re-open lines and to clear a firm base near each marker stake. It was necessary to cut and remove the mat of roots so that the base plate of the gravimeter could be firmly placed on a clay or soil base. If this was not done it was nearly impossible to maintain the meter level. If the elevation of the baseplate at the leveled site deviated more than about 10 cm from the elevation at the base of the survey picket, then the elevation difference was noted and later added or subtracted from the elevation given for that stake. During the rainy season, a large umbrella, fixed over the gravimeter at each station, was very useful during all except the heaviest rains, allowing work to progress through most of the day. On two occasions, work was stopped for several hours because of surface waves from large, distant earthquakes.

### Quality Control and Statistics

A total of 1763 stations were occupied, and repeat measurements were made at 37 of these. These were repeated from different loops and sometimes from different bases. The average difference between a pair of repeat readings was 0.040 mgal, and the standard deviation was 0.023 mgal. Thus, the contour interval of 0.1 mgal on the maps was conservative, and if desired an interval of 0.05 mgal could be justified by the data quality. Twenty-one secondary base stations were established along the base line, using averages of several occupations from multiple loops.

### Data Treatment

Data were entered on storage files on a 5.25" magnetic diskette using a KayPro II computer. A FORTRAN program written by the author was then used to make the routine corrections and standard calculations. Standard drift corrections were made, assuming linear drift during the short 2-hour loops. Thus, tidal variation and instrument drift were removed simultaneously. The latitude correction was calculated using the interpolation formula found in Dobrin (1976) or Telford, et al (1976). A reference

latitude of 0.3333 degrees was assigned to the baseline, and an arbitrary "theoretical sea level gravity" of 978050.00 was assigned for that latitude. Thus, the N-S coordinate of each station, in meters, was used directly for the latitude correction. The arbitrary values for base station "observed gravity" and theoretical sea level gravity were chosen to produce a small positive number for the Bouguer Anomaly. With the large data set available, a statistical regression of Free Air Anomaly against station elevation was done, and resulted in the relationship:  $FAA = 11.715 + 0.086(ELEV.)$  This slope was then used in the expression:  $0.0419(Density) = 0.086 \text{ mGal/m}$ . Solving for density gave  $2.05 \text{ gm/cm}^3$ . A rounded density value of 2.00 was used for the material above datum in the Bouguer correction for the entire survey area.

Because of locally steep slopes, it was decided to apply near topographic corrections to the gravity data. A computational method modified from Kane (1962) was programmed to operate on a uniform square grid of elevation points. The points adjacent to the station were treated as sloping quadrants, and all outlying stations were treated by approximating them (square vertical prisms 40 m by 40 m in area) to annular segments of a ring. A maximum distance of 4 stations was used for the W half of the area and 5 stations for the E half. The final map is diminished in size by the diameter of the correction zone, *ie*, 4 stations implies the loss of 4 lines on each side of the map and the northern and southern 4 stations on each line. Elevations were interpolated for the missing line between Lines 1 and 2, and for two missing lines between Lines 26 and 27. Also, elevations were interpolated at the N and S ends of all short lines to complete the square grid of elevations needed for the program. With a radius of 4 stations, the gravity effect of a total of 76 elevation points had to be calculated at each station. Terrain corrections reached a maximum of 0.43 mGals. The output of this Fortran program was used to construct the Complete Bouguer Anomaly Map.

### The Complete Bouguer Anomaly Map

This map, with a contour interval of 0.1 mgal, (Figure 2) shows various gravity highs and lows superposed on a broad positive zone through the center of the map area. In general, the gravity map shows the N, S, and E boundaries of the ultrabasic rock body, with the northern boundary well defined at about 640 meters N of the baseline. The southern boundary is more irregular, but is probably approximated by the 12 mgal contour. Within the "regional" high defined by the ultrabasic body lie various local gravity maxima and minima.

# Gravity in Amapa

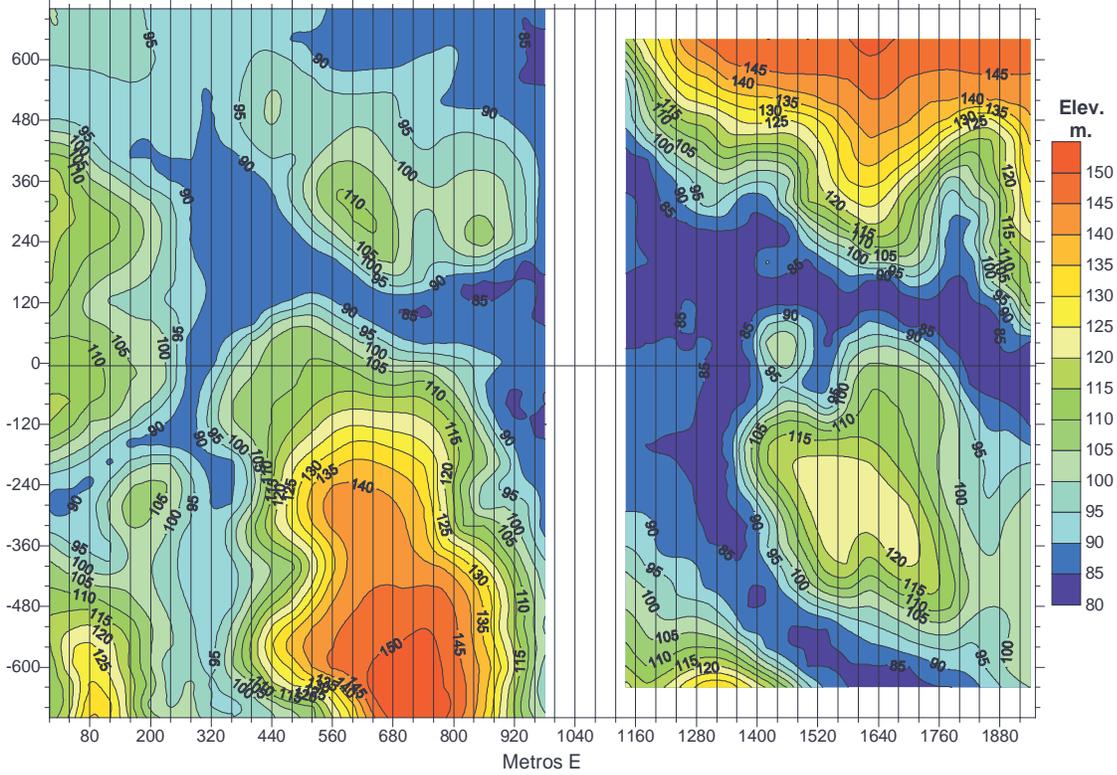


Figure 1: Topographic map of the prospect area. The left and right sections were known as Bacuri-A and Bacuri-B. Survey lines at nominal 40 meter spacings are shown. The Base Line is the W-E line through the center.

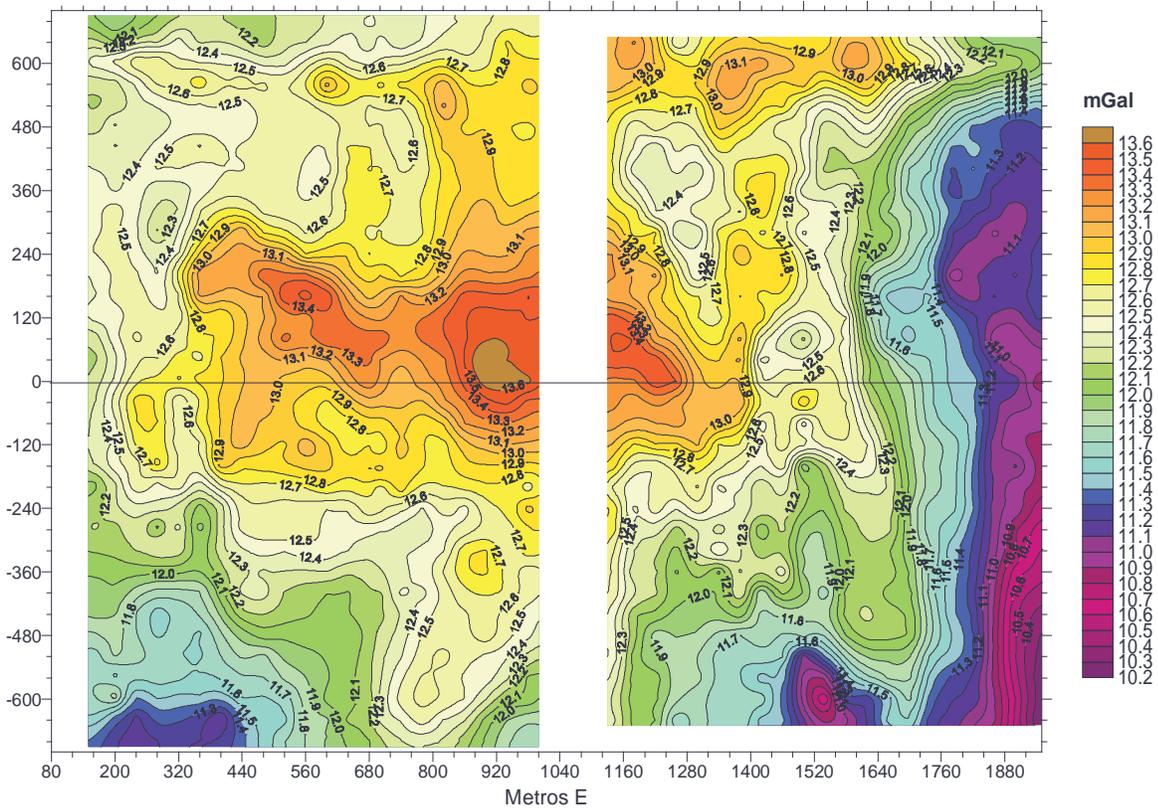


Figure 2: Complete Bouguer Anomaly Map (with arbitrary datum).

## Gravity in Amapa

The relief or range of Bouguer gravity values in the map area is 3.3 mgal, which is considerable for such a small area and indicates large density variations. The northern boundary of the ultrabasic body appears to be marked by a sublinear row of highs at 600-640 N. The eastern limit of the ultrabasic body is clearly defined by the sharp gradient centered on the 12 mGal contour.

### Interpretations

Because chromitite is a high density rock, the gravity highs were of economic interest in this area. However, it would be a mistake to simply assume that all gravity highs in this area are due to chromitite. Full interpretation of these results depends on the geological model for the mineralization, alteration, and structure, because some of the gravity highs could also be caused by a other effects, in addition to chromite mineralization, such as:

a) Incomplete or irregular serpentinization: serpentinization causes an increase in volume with a corresponding decrease in density. Areas not serpentinized would show as gravity highs.

b) Folding of lower-density country rock into the ultrabasic rock could create gravity lows whose adjacent highs are simple ultrabasic rock, not necessarily mineralized.

c) Areas with greater vertical extent or thickness of ultrabasic rock will cause gravity highs, and they will thus not necessarily indicate mineralization.

d) Areas with younger, unaltered basic intrusive rocks could cause gravity highs; occurrences of fresh gabbro or diabase have been found in the area.

e) Irregular depth of weathering: the thickness of the weathered layer may be increased by increased fracture density or by increased degree of alteration, causing gravity lows. Adjacent gravity highs would occur over unweathered zones, unserpentinized zones, or zones which had been silicified. A great thickness of weathering (50 -100 m ) could easily cause more than 1.0 mgal of gravity low.

Thus, most of the gravity highs were recommended for testing with the drill. Eliminating the low gravity areas reduced to nearly half the area considered prospectable, as there would be no significant chromite deposits in the gravity lows.

### Conclusions

This large data set, gathered under difficult conditions in a rain forest area whose precise geodetic location was not known in 1984, required some unconventional processing. This involved using arbitrary observed gravity and theoretical sea level gravity datums. Because the topography was

only known within the survey area, only the near terrain corrections could be done, adapting a method devised for data on a uniform grid. Choosing the appropriate density to apply for the Bouguer correction was not done with the classical trial and error graphing of profiles to satisfy the Nettleton (1939) criterion. Rather, it was done digitally with regression methods to minimize the correlation of Bouguer gravity with the elevation. These data, held confidential until now, were completely processed with a first-generation PC which had 64Kb of RAM (not Mb!), no hard drive, and was controlled by the CP/M operating system. Because the original data and results were stored on a floppy disk in columnar form in ASCII text format, it was trivial to access and re-contour them using SURFER in 2001.

### References

- Dobrin, M. B., 1976, Introduction to Geophysical Prospecting (3<sup>rd</sup> ed.), McGraw-Hill, New York, 630 p.
- DNPM, 1981, Mapa Geologico do Brasil; Escala 1:5.000.000, Brasilia.
- Grant, F. S. and G. F. West, 1965, Interpretation Theory in Applied Geophysics; McGraw-Hill, New York, 583 p.
- Kane, M. F., 1962, A Comprehensive System of Terrain Corrections Using a Digital Computer; Geophysics, v. 27, p. 455-462.
- Nettleton, L. L., 1939, Determination of Density for Reduction of Gravimeter Observations; Geophysics, v. 4, p. 176-183.
- Newhouse, W. H. (ed.), 1969, Ore Deposits as Related to Structural Features; Ch. IIIA. Ore Deposits in Massive Rocks; Hafner Pub. Co., New York, 280 p.
- Telford, W.M., L.P. Geldart, R.E. Sheriff, and D.A. Keys, 1976, Applied Geophysics; Cambridge Univ. Press, 860 p.

### Acknowledgements

I would like to thank Mr. Roberto Kozuki, geologist of ICOMI, for initiating the contact with UFPa and FADESP, and for his orientation in the field. Thanks are owed to colleagues in FADESP and in the Department of Geophysics, Federal University of Pará, for their support during this project. Prof. Geraldo das Virgins Alves assisted during one trip with 5 students of the Field Geophysics class. Special thanks to all the field personnel who assisted in the encampment and those who accompanied me along the survey lines, opening my eyes to more wonders of the Amazon forest.



## Mining Geophysics in the New Millenium

*William A. Sauck, Western Michigan University, USA*

### Abstract

The present status of mining exploration geophysics is reviewed. Most methods have been accompanying the ongoing revolutions in computing and mass storage. One can expect the trends for faster computing, smaller computers, and denser storage media to continue in the years to come. Change is the common factor for developments in geophysics for the near future. Field equipment will evolve to record many more channels and parameters with higher precision. In mining geophysics this will mean gathering quantities of field data which were once thought to be impossible. In inversion and interpretation the advances in computing power may mean that algorithms which are too slow or impractical on today's computers will become more widely used in the future. Data sets once considered too large will be easily processed. With the opening of the states of the former Soviet Union, some of the novel techniques developed by former Soviet-bloc geophysicists will be tested and perhaps adapted in the West. Many of these geophysicists have already emigrated to other countries in search of more favorable economic conditions, and their influence is being felt.

### Introduction

A brief review of a world-wide activity such as mining exploration geophysics is difficult and necessarily biased by the writer's location in the world. I beg the reader's pardon for omissions. This review will examine equipment, techniques and practices for the year 2001, and will occasionally proceed into the unknown by speculating about the future.

### Gravity

Several developments have been important for the determination of gravity in remote areas and from aircraft. GPS technology has continued its expected improvements. Receivers are able to track simultaneously 10 or more satellites, and they are much less costly than a few years ago. Some are capable of tracking both the US and the former Soviet Union satellites. Most important was the discontinuation of Selective Availability (SA) last year, the intentional degradation of accuracy by the US military which had been in force since the first use of the GPS network. This has meant greatly improved accuracy in the determination of absolute X, Y, and Z coordinates. Accuracy is proportional to

the budget available, with real-time differential GPS of the best survey-grade instruments (with one operating as a local base) approaching the millimeter range. Principal remaining non-instrumental errors are the variable delays along paths through the ionosphere and through variable amounts of atmospheric moisture.

Gravimeters continue to be improved. Lacoste & Romberg offer a new land gravity meter that is completely computer controlled and self-leveling. They expect the current line of Models D and G land gravity meters will be slowly phased out. Micro-Gal resolution will become routine.

Airborne gravity was developed and used initially for mapping long-wavelength features of interest to basin-scale petroleum exploration. This was due to the considerable integration and averaging necessary to remove aircraft accelerations. Gumert and Phillips (2000) of Carson Services describe an improved helicopter gravity survey system (including the new GPS capabilities for absolute aircraft positioning) which reportedly can resolve 0.3 mGal features with half-wavelength of 1 kilometer. This certainly puts airborne gravity into the realm of mining exploration, especially in remote areas with rugged topography. An airborne gravity gradiometer (AGG) system has been developed by BHP Minerals (van Leeuwen, 2000). This was developed specifically for mineral exploration from a fixed-wing aircraft. Williams and MacQueen (2001) described another, more versatile system, which has been flown on 6 different fixed-wing platforms by Fugro-LCT. They compared a ground survey resampled at 500m intervals with the airborne data and found a fit with standard deviation of 0.6 mGal. Argyle, et.al. (2000) described the Sander Geophysics implementation of airborne gravimetry. Results over test sites indicated that for 100 knot flight speeds, 0.5 mGal repeatability can be expected with 1.5 km half-sine wave resolution for 200 meter line spacings.

As for inversion of gravity data, there have been more than 60 papers published in GEOPHYSICS on that subject in the last 25 years. The problem has been to get these advances into use by the explorationists. Silva, et.al. (2001) present a very readable review of a variety of inversion techniques and also address the implementation problem.

### Magnetic Method

The optically-pumped cesium vapor systems have become well established for land and marine surveys in the past several years. With sensitivity to 0.01 nT,

and repetition rates to 0.1 sec, this is a major advance over the proton-precession systems. We can now gather land data along line at pixel-scale while in continuous motion, rather than at discrete points on a grid. The speed allows smaller line spacings to be used, thus greatly improving the resolution of small features. U.S. government support for development of detection systems for UXO and land mines has provided much of the impetus and funding for these advances. These can easily be used in vertical or horizontal gradiometer modes, and multiple instruments can be attached to frames to cover or “sweep” an area in great detail. GPS technology has also been integrated into land magnetometers of this type. Operating system software has become user-friendly and now allows an entire survey block to be defined in advance, with x,y coordinates calculated for each data point. After downloading a survey block to a laptop computer, doing minimal editing and rectification, color contour maps can be produced in a matter of minutes in the field. In Clark (2000), Ross Johnson of Geometrics suggests that a new, inexpensive model of the proton-precession magnetometer will be available with 0.1 nT capability at a 1 second repetition rate.

Airborne exploration geophysics surveys routinely use a magnetometer in addition to a number of other sensors. With the great improvement in GPS for exact positioning of aircraft flight paths, and high-resolution magnetometers, very precise magnetic maps can be made. New micro-leveling techniques have been developed to make small heading and other types of corrections. Subtle, low-amplitude anomaly features can be mapped with these techniques.

### **Seismic Methods**

The past decade witnessed a very large increase in the application of seismic methods to mineral exploration and mine development. The “Exploration 97 Conference” which was held in Toronto in 1997 was a landmark review of the seismic, as well as other methods, in mining. Sixteen of those papers were reproduced in a special section of *GEOPHYSICS* (Asten, 2000), and these are highly recommended reading for those who are seriously interested in this topic. Mining geophysics has benefited greatly from the developments in instrumentation and processing techniques made by petroleum seismology. This applies to in-line 2-D surveys, 3-D surveys, vertical seismic profiling (VSP), and cross-borehole tomography. These methods have been tested and used in production surveys at most of the massive sulfide districts in Canada, as well as many locations in S. Africa and

Australia. Many of these papers show seismic sections and time slices which clearly display reflections from the massive sulfide orebodies. Physical properties work (Salisbury, et al., 2000) has shown that on a  $V_p$  vs. density plot, the sulfide field is far to the right of the field of the Nafe-Drake curve for normal crustal rocks. Thus, the strong reflections are based on large acoustic impedance contrasts. In addition, structural features such as lower angle contacts and faults are imaged. High-angle to sub-vertical structures are not directly imaged with seismic reflection, but are best seen with EM techniques; hence the two methods are complementary.

### **Electromagnetic Methods**

Developments have progressed in several directions. Early-time pulse-EM is achieving depths less than 10 meters, while other systems attempt to improve resolution at far greater depths. Vertical gradient receivers have been proposed for TEM (Sattel and Macnae, 2001) to improve resolution of shallow conductivity structure. (Note that the Geonics EM-61 has used this successfully for several years for shallow environmental metal detection applications.) A prototype receiver for the vertical gradient of the horizontal VLF field has been built (Bosch and Müller, 2001). This improves the discrimination between adjacent anomalies and will provide easy separation between small, near-surface anomalies and the deeper anomalies of economic interest.

The frequency range between conventional continuous-wave surface EM systems (<20kHz), and GPR (>25 MHz) is being “explored” more, particularly in borehole systems. At the Century zinc deposit in Australia, radio-frequency EM (RFEM) imaging with the RIM system, operating at 520 kHz, was used to make a clear image of an ore zone cut by a fault (Mutton, 2001). Note that this radio absorption imaging was only successful after reprocessing with a new tomographic inversion program which incorporated both the amplitude and the phase information. The panel was between boreholes separated by approximately 50 meters. Another RFEM survey was reported from the Sudbury district (Fullager, et al., 2000). They showed a radio absorption tomogram made between boreholes that showed a massive sulfide body. This was done with Chinese JW-4 system at 5 MHz. Other RFEM systems were developed in the 1990’s in Russia and in S. Africa.

Airborne EM systems of the pulse type have evolved to a transmitter step function with rms dipole moments of 450,000 Am<sup>2</sup> for fixed wing aircraft (Leggatt, et al., 2000), with prospects for doubling

this figure shortly. Output of the inversion program is presented as apparent resistivity (or conductivity)-depth parasections. Multi-frequency helicopter EM (HEM) techniques have also improved. Instead of the apparent resistivity maps for each different frequency, the common output is now the apparent resistivity parasection. This may be made with 2-D inversion programs, or done quite well via a running multi-layer 1-D inversion along the flight line (Sengpiel and Siemon, 2000).

### Resistivity and Induced Polarization

The venerable *mise-a-la-masse* (MALM) method is still valuable when an exploratory borehole intersects massive sulfide ore. Hattula and Rekola (2000) report a massive sulfide discovery at 512 m depth (in Finland) was based on this method. Further modeling incorporating known geology projected three more sulfide bodies near 700 m, one of which was confirmed by drilling.

Resistivity equipment went to computer-controlled switching of electrodes in the 1990's, a long-overdue development. I am also pleased to report that some manufacturers have installed multi-channel (8) capability. There is no reason why this should not have occurred much earlier, and this should quickly expand to 24 or 48 receiver channels, as was done long ago in portable seismic systems. When this is implemented, we will be able to energize an area of interest with a number of different current dipoles, and measure simultaneously at a multitude of potential electrodes spread over the area on a grid pattern. This should initiate a new era of resistivity measurement.

Joint inversion of 2-D resistivity and IP data has been implemented for a number of years (Oldenburg, et al., 1997), and incorporating topography (Loke and Barker, 1996). Li and Oldenburg (2000) used an approximate inverse mapping (AIM) technique to

construct a 3-dimensional IP model that reproduced the field data. Results of their 2-D inversion are also illustrated in Mutton (2000).

### Ground-Penetrating Radar

GPR has had somewhat limited use in metallic minerals exploration, but has found some use in borehole applications. This takes the form of cross-borehole tomography (velocity and attenuation tomograms), crosshole reflection, and single-hole reflection. All of these techniques were tested by Fullagar, et al. (2000) at Sudbury, using 60 MHz antennae. Mutton (2000) reported a test of the 60 MHz borehole system at the Century deposit in Australia, but found penetration limited to about 5 m in weakly conducting sediments and 25 m in limestones. However, White, et al. (1999) show several applications of GPR in deep underground mine workings in S. Africa. Their custom-made, ruggedized system is routinely used for geological mapping (delineation of ore-bodies, faulting, and intrusives), and for mapping potentially hazardous roof discontinuities. In the Witwatersrand gold mines, Trickett et al. (2000) used borehole radar (BHR) in the high resistivity quartzite host rock to map the ore-bearing "reefs" directly, as well as off-setting faults.

There are other applications of routine GPR use in mine safety applications, such as locating dolines or solution cavities ahead of mining, and for locating long-abandoned drifts and stopes below new open-pit mines.

GPR has been used with some success in prospecting for alluvial (placer) deposits. Where overlying clays or soils are not too thick or are not too conductive, the GPR is an efficient means of mapping the paleochannels. Figure 1 is an example of a profile in central Brazil where diamonds were being extracted from a boulder unit. The boulder bed

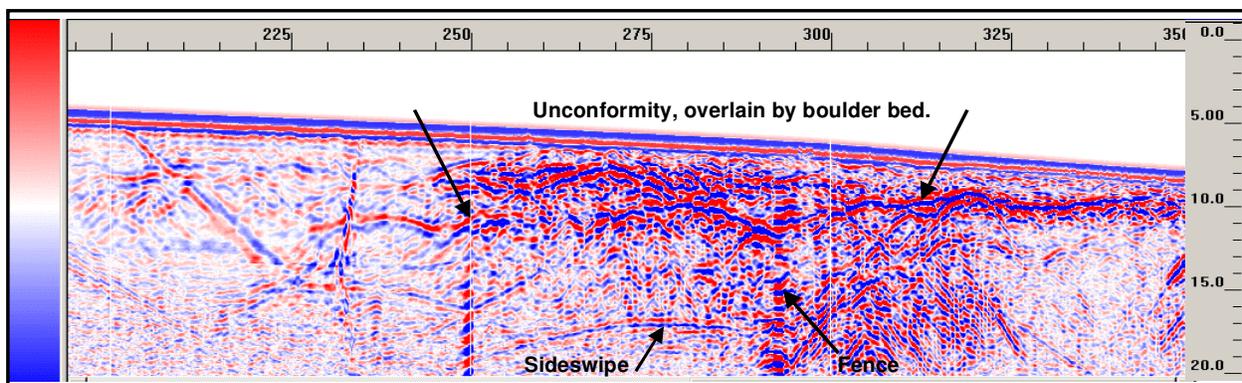


Figure 1: GPR profile from northern Minas Gerais; vertical scale (at left edge) is 400 nanoseconds. Diamond prospecting in paleochannels containing large boulders. Depth scale is in meters for an assumed relative permittivity of 9. Sensors & Software PE100, 28/11/00.

was exposed at the base of a slope (right edge of profile), and was deposited on a pronounced unconformity. GPR was used to map the lateral extent of the boulders (bright hyperbolae) beneath increasing depths of soils upslope, to the left (pers. comm., G. Mello, 2001).

### References Cited

- Argyle, M., S. Ferguson, L. Sander, and S. Sander, 2000, AIRGrav results: a comparison of airborne gravity data with GSC test site data: *The Leading Edge*, Vol. 19, No. 10, pp. 1134-1138.
- Asten, M.(ed.), 2000, Special section on mining geophysics - Introduction: *Geophysics*, Vol. 65, No. 6, p. 1851.
- Bosch, F.P. and I. Müller, 2001, Continuous gradient VLF measurements: a new possibility for high resolution mapping of karst structures: *First Break*, Vol. 19, No. 6, pp. 343-350.
- Clark, D., 2000, Whither geophysical technology? The views of the vendors: *The Leading Edge*, Vol. 19, No. 8, pp. 862-873.
- Fullagar, P.K., D.W. Livelybrooks, P. Zhang, A.J. Calvert, and Y. Wu, 2000, Radio tomography and borehole radar delineation of the McConnell nickel sulfide deposit, Sudbury, Ontario, Canada: *Geophysics*, Vol. 65, No. 6, pp. 1920-1930.
- Gumert, W.R. and D. Phillips, 2000, Advanced Helicopter aerogravity surveying system; *The Leading Edge*, Vol. 19, No. 11, pp. 1252-1255.
- Hattula, A. and T. Rekola, 2000, Exploration geophysics at the Pyhäsalmi mine and grade control work of the Outokumpu Group: *Geophysics*, Vol. 65, No. 6, pp. 1961-1969.
- Leggatt, P.B., P.S. Klinkert, and T.B. Hage, 2000, The Spectrem airborne electromagnetic system – Further developments: *Geophysics*, Vol. 65, No. 6, pp. 1976-1982.
- Li, Y. and D.W. Oldenburg, 2000, 3-D inversion of induced polarization data: *Geophysics*, Vol. 65, No. 6, pp. 1931-1945.
- Loke, M.H. and R.D. Barker, 1996, Rapid least-squares inversion of apparent conductivity pseudosection using a quasi-Newton method: *Geophysical Prospecting*, Vol. 44, No. 1, pp. 131-152.
- Mutton, A.J., 2000, The application of geophysics during evaluation of the Century zinc deposit: *Geophysics*, Vol. 65, No. 6, pp. 1946-1960.
- Oldenburg, D.W., Y. Li, and R.G. Ellis, 1997, Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case history for Mt. Milligan: *Geophysics*, Vol. 62, No. 5, pp. 1419-1431.
- Salisbury, M.H, B. Milkereit, G. Ascough, R. Adair, L. Matthews, D.R. Schmitt, J. Mwenifumbo, D.W. Eaton, and J. Wu, 2000, Physical properties and seismic imaging of massive sulfides: *Geophysics*, Vol. 65, No. 6, pp. 1882-1889.
- Sattel, D. and J. Macnae, 2001, The feasibility of electromagnetic gradiometer measurements: *Geophysical Prospecting*, Vol. 49, No. 3, pp. 309-320.
- Sengpiel, K.P. and B. Siemon, 2000, Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration: *Geophysics*, Vol. 65, No. 6, pp. 1983-1992.
- Silva, J.B.C., W.E. Medeiros, and V.C.F. Barbosa, 2001, Potential-field inversion: Choosing the appropriate technique to solve a geological problem: *Geophysics*, Vol. 66, No. 2, pp. 511-520.
- Trickett, J.C., F. Stevenson, D. Vogt, I. Mason, J. Hargreaves, H. Eybers, R. Fynn, and M. Meyering, 2000, The application of borehole radar to South Africa's ultra-deep gold mining environment: *Proceedings of the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2000*, Gold Coast, Australia (CD-ROM).
- Van Leeuwen, E.H., 2000, BHP develops airborne gravity gradiometer for mineral exploration: *The Leading Edge*, Vol. 19, No. 12, pp. 1296-1297.
- White, H., A. du Plessis, K. Noble, and M. Treloar, 1999, Routine application of radar in underground mining applications: *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP'99)*, Oakland, CA, pp. 197-206.
- Williams, S. and J. D. MacQueen, 2001, Development of a versatile, commercially proven, and cost-effective airborne gravity system: *The Leading Edge*, Vol. 20, No. 6, pp. 651-654.



## Prospecção Geométrica da Grafita

Francisco Saíd Gonçalves, geólogo da SOHIDRA  
James Huxley Q. de Carvalho, geólogo da SOHIDRA

### Abstract

Neste painel apresentamos os resultados obtidos na pesquisa geométrica da grafita em uma área situada na fazenda Riacho das Lages, distrito de Pedra Branca no município de Aracoiaba CE, Brasil, utilizando o Mapeamento Wenner ou Sondagem Elétrica Horizontal e Perfis Elétricos Schlumberger. A escolha da metodologia aplicada baseou-se no conhecimento das propriedades físicas do bem mineral em apreço.

### Introdução

O objetivo primordial da utilização dos métodos geofísicos na prospecção mineral é a busca de anomalias que permitam diferenciar o corpo mineralizado em contraste com a rocha encaixante.

Esta pesquisa é pioneira no estado do Ceará quanto a utilização da eletroresistividade das rochas para obter informações confiáveis que possam reduzir os custos com métodos de investigação direta.

### Características geológicas da área

Rochas cristalinas do pré-cambriano, gnaisses e migmatitos, predominam na área. Destacam-se afloramentos de médio e grande porte no setor SW, próximo ao sangradouro do açude existente. Relevos suavemente ondulados.

### Grafita

Segundo Moraes et al., a grafita ocorre disseminada onde as maiores concentrações de pequenas palhetas formam bolsões (ore shoots) lenticulares encaixadas concordantemente em biotita-gnaiss bastante decomposta e verticalizadas, com direção de 40° Az. Nestes ore shoots o teor de grafita é da ordem de 80%. Análise química em uma antiga escavação revelam o seguinte percentual:

Carbono fixo	27.6
Cinzas	64.5
Matéria volátil	4.0
Umidade	3.9
<b>Total</b>	<b>100.0</b>

### Estudo Geofísico

#### Modelos adotados

Foram utilizados Mapeamento Elétrico ou Sondagem Elétrica Horizontal ou ainda Mapeamento Wenner.

Perfis Elétricos de Schlumberger, PES, com dados plotados em Mapa de Isoresistividade.

### Procedimentos de Campo

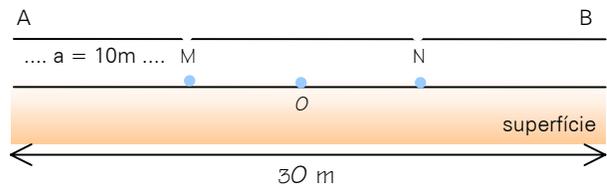
#### Arranjo dos eletrodos : Wenner

Medições realizadas em superfície, possibilitam avaliar a variação lateral de resistividade aparente de segmentos do terreno, com profundidades teóricas predeterminadas. Neste trabalho adotou-se a seguinte sistemática:

#### Profundidade de investigação P segundo Wenner

$$P = \frac{\overline{AB}}{4} \quad \text{onde } \overline{AB} = \text{dist. entre eletrodos de corrente}$$

Nível 01 Profundidade teórica de pesquisa = 7.5 m  
AM = MN = NB = a Portanto  $\frac{\overline{AB}}{4} = 30\text{m} = 7.5$



$$\overline{AB} = 3 \times a = 30\text{m}$$

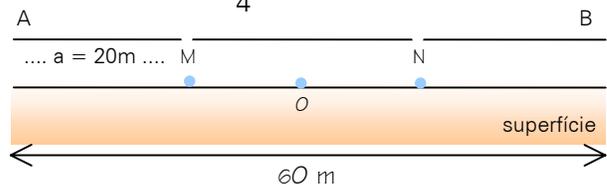
$$K = 2\pi \cdot a \quad \text{onde}$$

$$K = 2\pi \times 10 = 62.83$$

Nível 02 - Profundidade de 15.0 m

$$\overline{AB} = 3 \times a \Rightarrow \overline{AB} = 60\text{m}$$

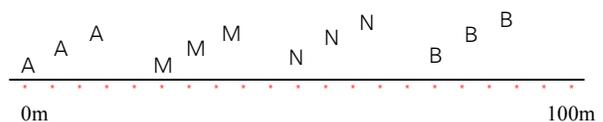
$$\text{Portanto } \frac{\overline{AB}}{4} = 60\text{m} = 15\text{m}$$



$$K = 2\pi a \quad \text{onde } K = 2\pi \times 20 \quad \therefore K = 125.66$$

Obs.: Todo o conjunto de quatro eletrodos é deslocado segundo o sentido escolhido do caminhamento

Ex.: E  $\Rightarrow$  W



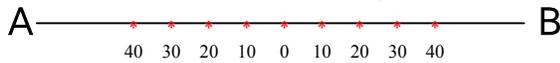
\* = pontos de leitura

## Configuração Schlumberger

### Perfil Elétrico

AB = 200 m, MN = 20,0 m, x = 10 m

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad MN < \frac{AB}{MN}$$



deslocamento de MN

Obs.: Os dados obtidos foram plotados em mapa de isoressistividade.

## Conclusões e recomendações

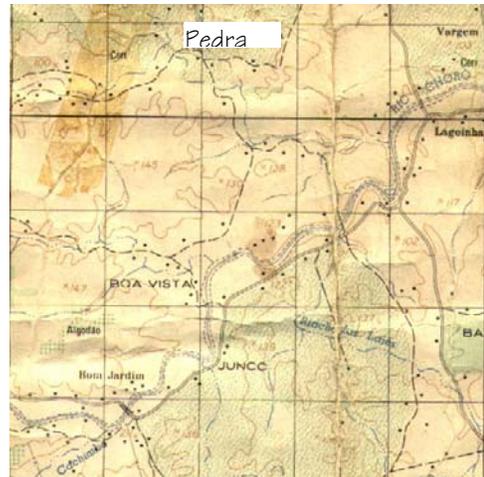
A interpretação é realizada através da análise de mapas planares de isoressistividade aparente, em escala de preferência vertical = horizontal, em sintonia com as minúncias de cada trabalho.

Os dados coletados no campo poderão ser processados utilizando-se softwares como o SUFER.

## Recomendações para os trabalhos de campo

1. Aplicar os dados coletados em campo em papel milimetrado com escalas adequadas e orientações dos caminhamentos.
2. Para a obtenção de leituras precisas e confiáveis se faz necessário adotar um rígido controle de qualidade de serviço de campo.
3. Preferencialmente cravar previamente os eletrodos ou utilizar fio trena bem demarcada.
4. Em caso de dúvidas repetir as leituras.

## Localização



Mapa Planoaltimétrico da SUDENE, folha Itapiúna Esc: 1 : 100.000

## Gráficos

Mapa (1) de isoressistividade aparente

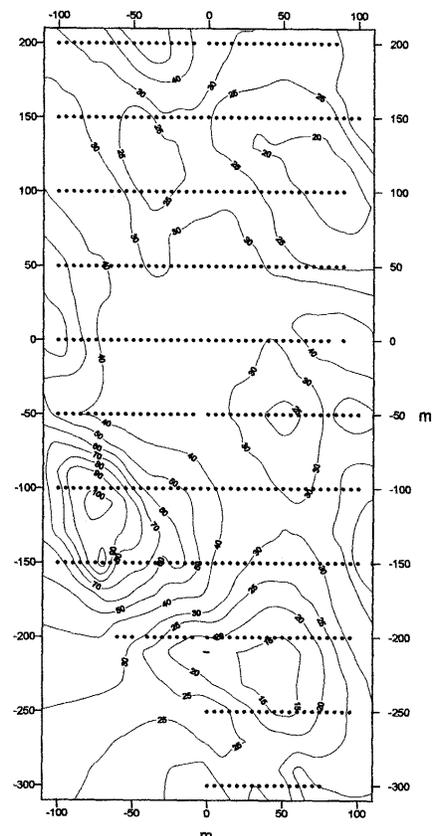
Intervalo de leitura = 5 m

Espaçamento a = 10 m

Configuração Wenner

$\Omega m$

Mapa 1





## **Bibliografia**

**Augustinho Rigoti** - Geofísica Aplicada à Prospecção Mineral - Curso pré-congresso em 20 à 21 de agosto de 1995 - Rio de Janeiro.

**Barker, P. D.** - 1989 - Depth of Investigation of Collinear Symmetrical Four Electrode Arrays; Geophysics, vol. 54, n.º 8, p.1031 – 1037

Exploracion Eletrica - I V. V. Iakubovskii - L. L. Liajov, versão espanhola, 3ª edição, Moscou

**Orellana, Ernesto** - Prospeccion Geoeletrica em Corriente Contínua - 1982 - Paranifo - Madrid.

**Parasnis, D. S.** - 1986 - Principles of Applied Geophysics - Chapman and Hall - London.

**Luiz, José Gouveia, Costa e Silva, Lúcia Maria** - Geofísica de Prospecção - Belém: Universidade Federal do Pará; Cejup, 19955

**Geologia da Região Nordeste do Estado do Ceará** - Projeto Fortaleza - DNPM – CPRM – MME - 1981

**Sena, F. °**, 1977. Identificação geofísica de corpos condutivos na região de Santa Luz – Bahia, Tese de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.



## Recuperação em Meio Digital dos Dados do Projeto Aerogeofísico Camaquã

Maria Laura Vereza de Azevedo, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, mlva@cprm.gov.br

### Abstract

The Camaquã aerogeophysical project, flown in 1972 in south of Brazil, had as final products only total field magnetic contour and gamma-ray analysis maps. The recovery in digital medium of the final data (magnetometry and gamaspectrometry) adds important contributions to the geology as well as the structural control of the Sul-Rio-Grandense Shield.

### Histórico

O levantamento aerogeofísico Camaquã (magnetometria e gamaespectrometria) foi realizado pela Texas Instrument, Inc. no estado do Rio Grande do Sul nos anos de 1972 e 1973. Os produtos finais consistiram de mapas de intensidade magnética total, de análise de raios gama e de linhas de vôo, não havendo registro de fita magnética final. O tamanho dos cristais detectores foi de 2.491,59 polegadas cúbicas, espaçamento das linhas de vôo de 1km, projetadas com a direção N45°W, devido à orientação NE-SW da Bacia do Camaquã.

No início da década de 90, a CPRM - Serviço Geológico do Brasil foi informada da existência de pastas contendo os dados do projeto, na forma de listagens de computador, sob a guarda do DNPM. Com o intuito de se aproveitar aquelas informações existentes, a CPRM iniciou a digitação dos dados contidos nas listagens de computador, bem como a digitação dos mapas de linhas de vôo. Com a conclusão do processo, obteve-se um arquivo XYZ do projeto com perfis georeferenciados, contendo dados corrigidos de urânio, tório, potássio, contagem total e magnetometria (campo total).

### Processamento dos Dados

Os dados foram processados utilizando-se o software Oasis montaj, da empresa Geosoft. Primeiramente foi feita a edição das linhas de vôo. A seguir foram feitos os grids dos canais de contagem total, potássio, urânio, tório e magnetometria (campo total). A seguir procedeu-se a processos de filtragem. Para os canais de contagem total, potássio e tório foi utilizada a técnica de decorrugação, com filtro Butterworth e filtragem direcional. Para os canais de urânio e magnetometria foi feito micronivelamento (figuras 1 a 5).

### Contexto Geológico Regional

O projeto aerogeofísico Camaquã está inserido no escudo Rio-Grandense do Sul. O mapa geológico simplificado, com a localização do projeto (figura 6), foi

obtido a partir do trabalho Geologia do Rio Grande do Sul (Paim *et al.*, 2001). Dois sistemas de falhas principais ocorrem na área: um nordeste regional N20°-30°E, de caráter transcorrente e outro noroeste N40°-80W, secundário.

### Interpretação dos Dados

#### a) Dados aerogamaespectrométricos

O mapa de diagrama ternário (figura 7) foi confeccionado usando-se a composição RGB (K, Th, U). A correlação geológico-geofísica acha-se bem evidenciada, revelando caráter distinto para os diversos granitos cartografados na área.

#### b) Dados aeromagnetométricos

Para auxiliar na delimitação das feições estruturais da área, foi elaborado o mapa de relevo sombreado do campo magnético total, com  $I = 45^\circ$  e  $D = 45^\circ$  (figura 8). Os lineamentos magnéticos apresentam uma boa correlação com o sistema de falhas NE-SW regional e NW-SE, subordinado. A sua análise estabelece, ainda, relações com os corpos graníticos mapeados.

#### c) As Minas do Camaquã

Na Bacia do Camaquã, no município de Caçapava do Sul, Estado do Rio Grande do Sul, localizam-se as minas de Cu, Pb, Zn (Au e Ag) do Camaquã (mapa geológico simplificado, figura 6), esgotadas em abril de 1996, chegando a alcançar a profundidade de 300 metros. As principais estruturas mineralizadas na área das minas estão associadas ao sistema de falhas NW-SE, o que é reforçado pelos dados aeromagnetômicos (figura 9). Acredita-se na existência de outras mineralizações associadas a falhamentos de mesma direção, porém debaixo de uma espessa camada de sedimentos (Alogruppo Guaritas). Dessa forma, um estudo a ser feito é estabelecer o controle das mineralizações através dos *trends* geofísicos.

### Conclusões

Projetos aerogeofísicos antigos, com controle de qualidade na aquisição dos dados, medidas e posicionamento confiáveis, em conjunto com técnicas modernas de processamento, podem adicionar importantes contribuições à geologia e ao controle tectono-estrutural de uma área. Como exemplo, a obtenção em meio digital e o reprocessamento dos dados do projeto aerogeofísico Camaquã, voado em 1972, cujos resultados foram apresentados nesse trabalho.

### Bibliografia

Paim, P. S. G.; Chemale, F.; Lopes, R. da C. 2001. Geologia do Rio Grande do Sul. (Trabalho inédito a ser publicado em junho de 2001).

Chemale, F.; Hartmann, L. A.; Silva, L. C. Silva. Stratigraphy and tectonism of the Brasiliano Cycle in southern Brazil. *Communs geol. Surv. Namibia*. 10 (1995). 151-166.

Ronchi, L. H.; Lobato, A. O. C. (Orgs). Minas do Camaquã; um estudo multidisciplinar. Rio Grande do Sul: UNISINOS, 2000. 366p.

Projeto Aerogeofísico Camaquã – Estado do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: CPRM/DNPM/CNEN/TEXAS INST, 1973. 221p.

### Agradecimentos

Gostaria de agradecer à CPRM – Serviço Geológico do Brasil pela oportunidade da realização desse trabalho. Agradeço também à equipe da Superintendência da CPRM de Porto Alegre, em especial ao geólogo João Ângelo Toniolo, as informações referentes à geologia da área.

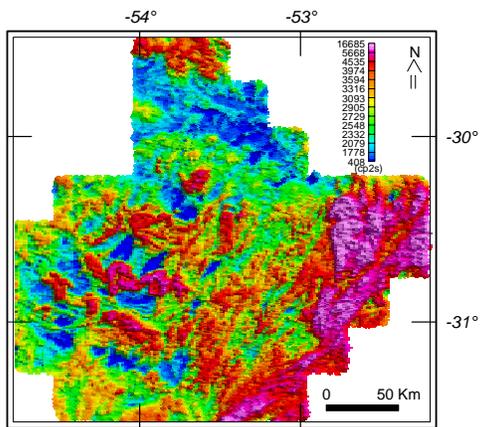


Figura 1. Mapa do Canal de Contagem Total.

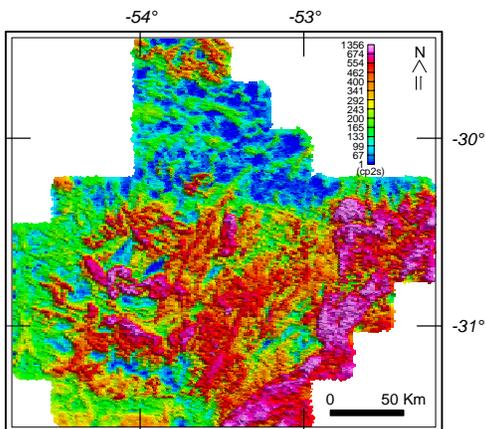


Figura 2. Mapa do Canal do Potássio.

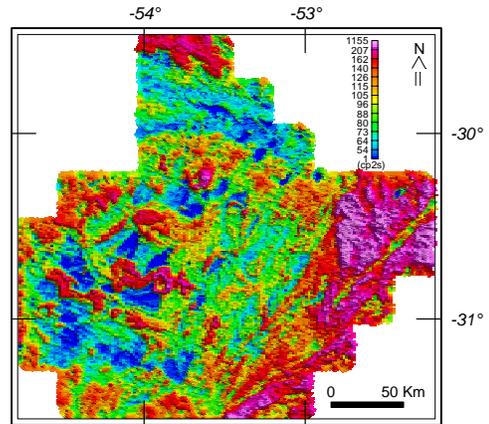


Figura 3. Mapa do Canal de Tório.

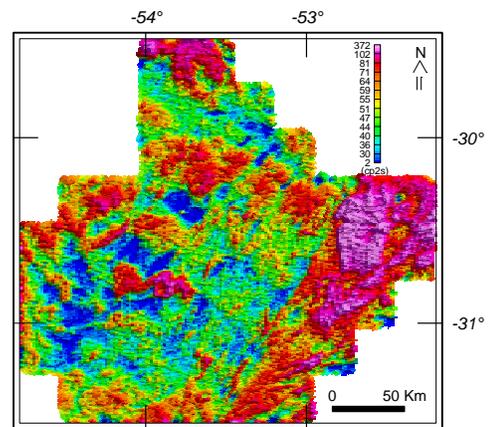


Figura 4. Mapa do Canal de Urânio.

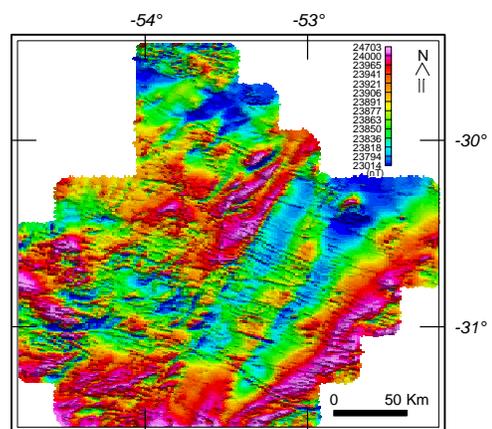
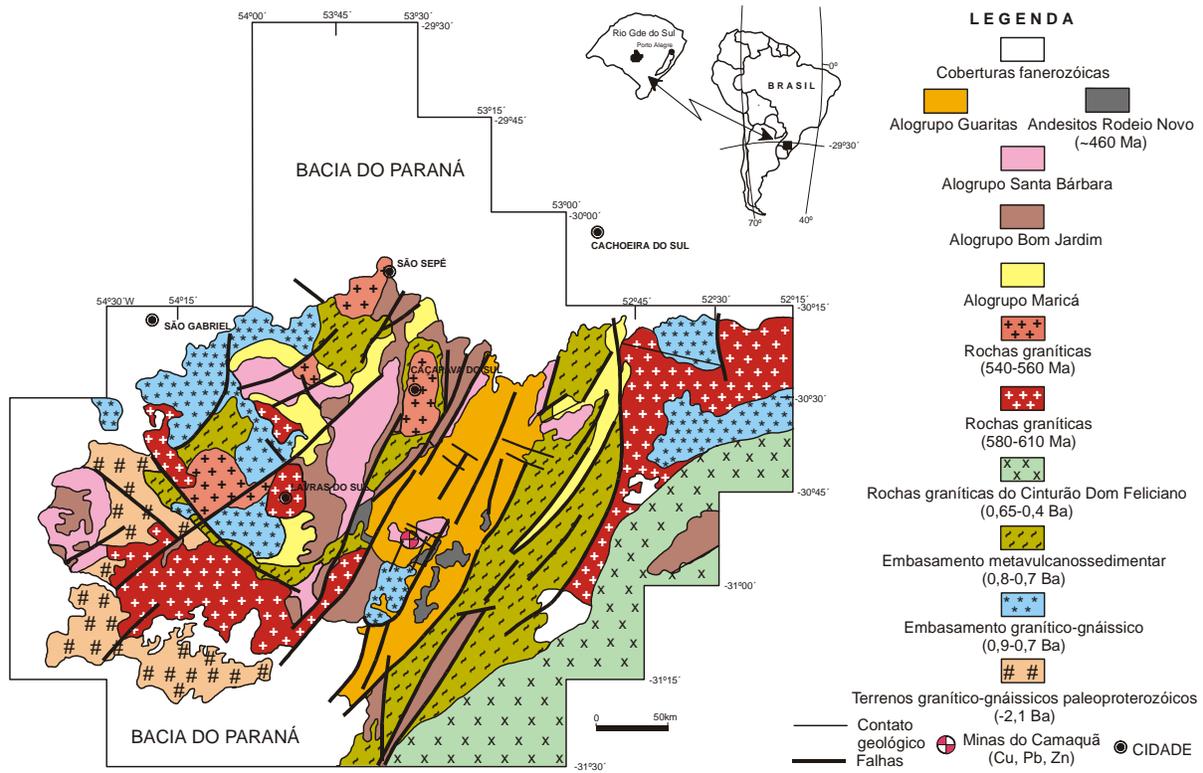
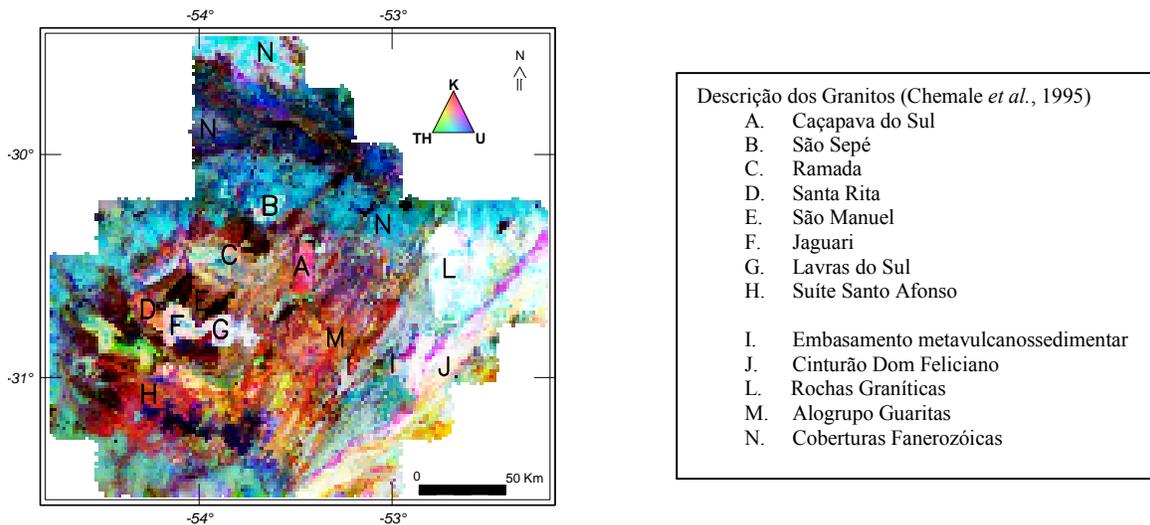


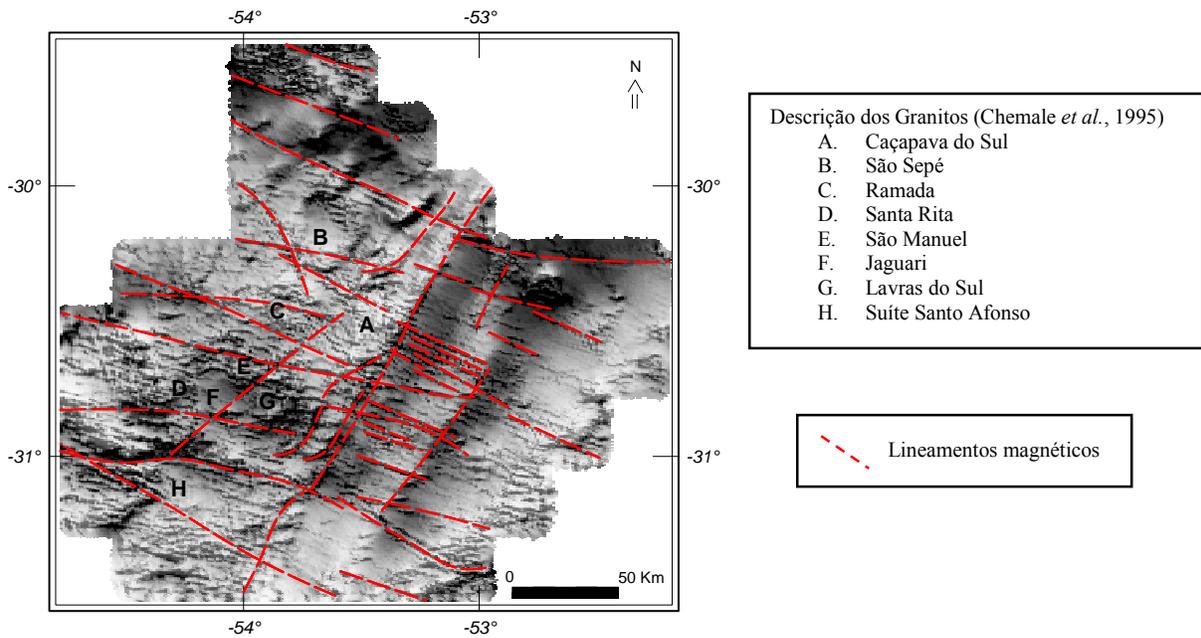
Figura 5. Mapa do Campo Magnético Total.



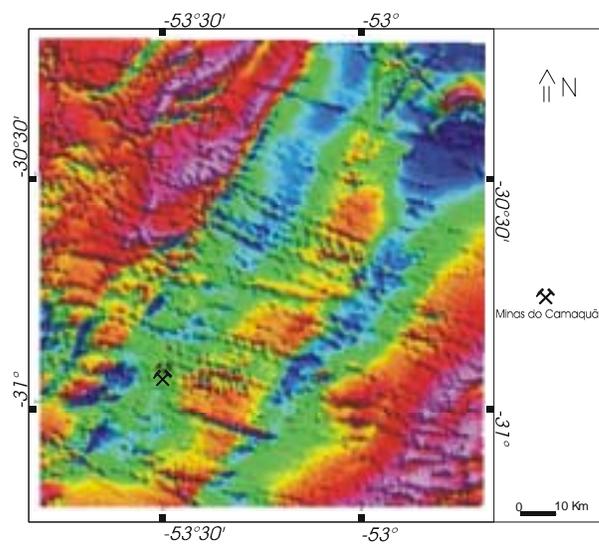
**Figura 6.** Mapa Geológico Simplificado, obtido a partir do trabalho Geologia do Rio Grande do Sul (Paim *et al.*, 2000).



**Figura 7.** Mapa do Diagrama Ternário, usando-se a composição RGB (K, Th, U).



**Figura 8.** Mapa de Relevo Sombreado do Campo Magnético Total ( $I = 45^\circ$ ,  $D = 45^\circ$ ).



**Figura 9.** Detalhe do Mapa do Campo Magnético na área da Bacia do Camaquã.



## Segunda Derivada e Integral Vertical no Processamento de Dados Aeromagnetométricos do Complexo Bossoroca, São Sepé, RS - Brasil

Márcio de Souza Soares, Jair Carlos Koppe & João Felipe C. C. Leite

LPM – UFRGS e-mail: [soaresm@ufrgs.br](mailto:soaresm@ufrgs.br), [jkoppe@ufrgs.br](mailto:jkoppe@ufrgs.br), [jfelipe@ufrgs.br](mailto:jfelipe@ufrgs.br)

### Introdução

Processamento de dados aeromagnetométricos tem se mostrado uma excelente ferramenta para exploração mineral nos últimos cinquenta anos, como por exemplo, para determinar as profundidades do embasamento para indústria do petróleo ou para localizar e delinear corpos magnéticos (Nettleton, 1976). A aplicação dos métodos utilizados para separação de comprimentos de ondas de baixa frequência pela filtragem da integral vertical em Z (Baranov, 1957) e de altas frequências através da segunda derivada vertical em Z (Henderson & Zeitz, 1949), é o foco deste trabalho, mostrando os resultados preliminares do processamento e interpretação de dados aeromagnetométricos da região do Complexo de Bossoroca.

A área de estudo situa-se na região de São Sepé aproximadamente 400 km a oeste de Porto Alegre, na porção central do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). A região é formada pela Seqüência Campestre e a Seqüência Arroio Lajeado, Koppe et al. (1985), pertencentes ao Complexo Bossoroca do Bloco São Gabriel do Escudo Sul – riograndense.

### Ambiente geológico

A região do Complexo Bossoroca está inserida na geologia do oeste do escudo Sul – rio – grandense, localizando-se no distrito de Vila Nova, município de São Sepé, RS, Koppe et al. (1985). O Complexo Bossoroca subdivide-se em duas Seqüências principais intrudidos por granitóides tardios (figura 1).

A seqüência Arroio Lajeado é composta por xistos magnesianos, serpentinitos, metabasaltos, metagabros, metacherts, formações ferríferas, metatufos e outras rochas metassedimentares, no qual faz contato à oeste com o Complexo Cambaí e a leste com a Seqüência Campestre separadas pela falha denominada Bossoroca.

A seqüência Campestre, onde se encontram sete ocorrências auríferas, encontra-se em contato a oeste com a Seqüência Arroio Lajeado e a nordeste pelo granito São Sepé. Composta preferencialmente por rochas vulcanoclásticas metamorfisadas na fácies xisto verde e, secundariamente, por metarenitos, metapelitos, metaconglomerados e metacherts. Idade obtida através do método U/Pb em zircão, é de aproximadamente 750 Ma, obtidos por Machado et al., 1988.

### Método de Análise

Todo o método e o processamento de análise dos dados aeromagnetométricos foi tratado no *software* Geosoft® versão 4.3, obtendo *grids* regulares com ¼ de espaçamento de linha de vôo (250 x 250 metros), utilizando o algoritmo de mínima curvatura para obtenção dos mapas de contorno.

### Aquisição e Pré-processamento

Os dados utilizados são oriundos do projeto Aerogeofísico Camaquã (Jackson et al. 1973), executado pelo convênio DNPM/CPRM e CNEM/CPRM pela Texas Instruments Inc. que constituiu um levantamento aeromagnetométrico segundo linhas de vôo N45°W espaçadas de 1km com uma altura média de 150 metros sobre o terreno. A metodologia utilizada no aerolevanteamento, e as correções aplicadas aos dados magnéticos podem ser encontradas na internet, na página da CPRM, no seguinte endereço:

<http://www.cprm.gov.br/aero/1000/aero1000.htm>

Foi subtraído dos dados aeromagnetométricos originais o IGRF (International Geomagnetic Reference Field - 1973) para eliminação de fontes magnéticas oriundas do núcleo. Segundo Vasconcellos et al. (1994), é necessária a seguinte operação básica para que os dados sejam tratados de forma qualitativa, no domínio da frequência:

- Pré – processamento;
- Transformação Fourier dos dados para o domínio da frequência;
- Determinação dos espectros de potência e aplicação dos filtros;
- Transformação Fourier dos dados filtrados de volta para o domínio do espaço e
- Pós – processamento.

O filtro cosseno direcional foi utilizado na direção N45°E (1.25 - opção rejeitar), para corrigir problemas referentes a alinhamentos ao longo das linhas de vôo.

### Processamento de dados

Para salientar comprimentos de onda de alta frequência, foi produzido um mapa de contorno utilizando o filtro de segunda derivada vertical (Henderson & Zeitz, 1949). De acordo com Pettipas and Church, (1990), a segunda derivada vertical está

intimamente relacionada com a curvatura do campo magnético e é particularmente útil para salientar anomalias rasas (Figura 2A). Os contornos dos mapas de segunda derivada podem coincidir com feições importantes como limites litológicos, falhas e zonas mineralizadas. Para obtenção de um mapa de contorno que se salienta os comprimentos de onda de baixa frequência (Figura 2B), foi calculada a integral vertical do campo magnético total, para obtenção de anomalias magnéticas em profundidade.

Os principais operadores matemáticos utilizados e que estão disponíveis no programa foram:

- $L(r) = r - 1$ , para integral vertical;

- $L(r) = r^n$ , para derivada vertical,

Onde  $n$  é a ordem de diferenciação (2) e  $r$  é o número de ondas dado por  $r = 2\pi k$ , onde  $k$  está em ciclos/metro.

## Resultados

Baseado nos padrões característicos dos mapas de contorno da segunda derivada e integral vertical, as seguintes correlações são propostas:

- Na figura 2A, as ocorrências auríferas estão associadas a lineamentos superficiais visto no mapa de segunda derivada, alinhada segundo uma direção NE-SW e NW-SE. Vasconcellos *et al* (1994), salienta que as curvas de segunda derivada delimitam as fontes (corpos) causadores das anomalias magnéticas, (figura 2A);

- Da mesma forma, estas ocorrências podem estar associadas a lineamentos profundos com direções NE-SW e NW-SE, de acordo com mapa da integral vertical do campo magnético anômalo (figura 2B).

## Conclusão

A metodologia aplicada para separação dos comprimentos de onda de baixa e alta frequência dos dados do campo magnético total da região do Complexo Bossoroca, por processos de filtragem como mapas de integral vertical e derivada vertical em Z, foi

satisfatório, na medida em que foi possível definir uma forte associação das ocorrências auríferas com os principais lineamentos nas direções NE-SW e NW-SW.

## Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer a entidade de pesquisa CAPES, pelo financiamento desta pesquisa, a CPRM por ceder os dados aerogeofísicos e aos professores, colegas e funcionários do Laboratório de Pesquisa Mineral da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## Referências

- Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudogravimetrics anomalies: Geophysics, vol. 22, p. 359 – 383.
- Church, B.N. and Pettipas, A.R., 1990. Interpretation of second derivative aeromagnetic maps at the Silver Queen and Equity Silver mines, Houston, B.C. CIM Bulletin, vol. 83, n° 934, p. 69 – 74.
- Koppe, J.C., Hartmann, L.A., Monteiro, R.N., 1985. Aspectos geológicos e Estratigráficos do Complexo Bossoroca, São Sepé, RS. In: Anais do II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Florianópolis – SC, p. 32 – 36.
- Henderson, R.G. and Zietz, I., 1949. Computation of the second vertical derivatives of geomagnetic fields: Geophysics, vol. 14, p. 508 - 516.
- Machado, N., Koppe, J.C., Hartmann, L.A., 1988. Upper Proterozoic zircon age from the Bossoroca Complex, RS. In: International Conference Geochemical Evolution of the Crust. Abstracts, Poços de Caldas, Brasil, p. 209 – 210.
- Nettleton, V., 1976. Gravity and magnetic in Oil Prospecting; Mcgraw Book Company.
- Vasconcellos, R.M., Metelo, M.J., Motta, A.C.M. Gomes, R.D., 1994. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil. CPRM, Rio de Janeiro, RJ, 165 p.

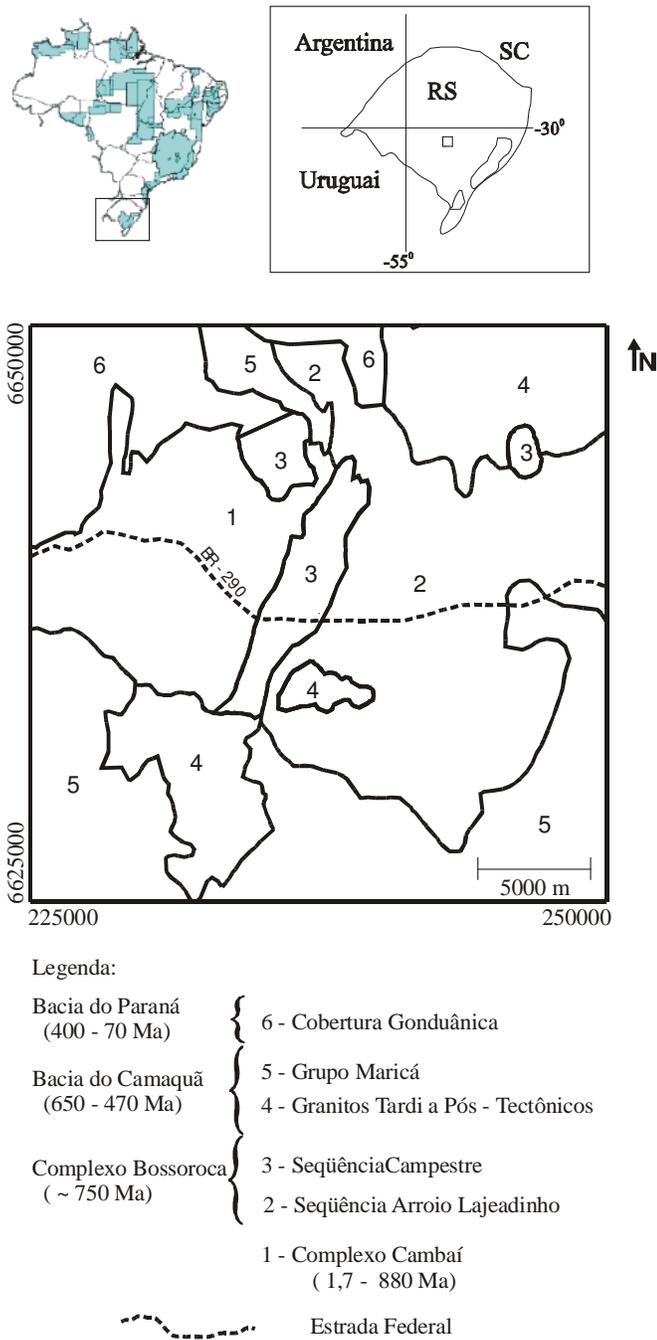


Figura 1. Mapa de localização e geológico da região do Complexo Bossoroca

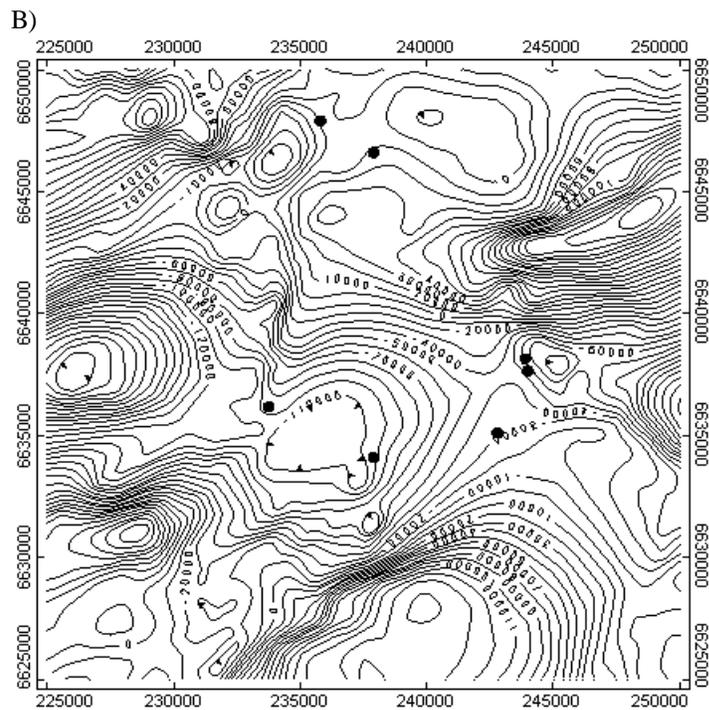
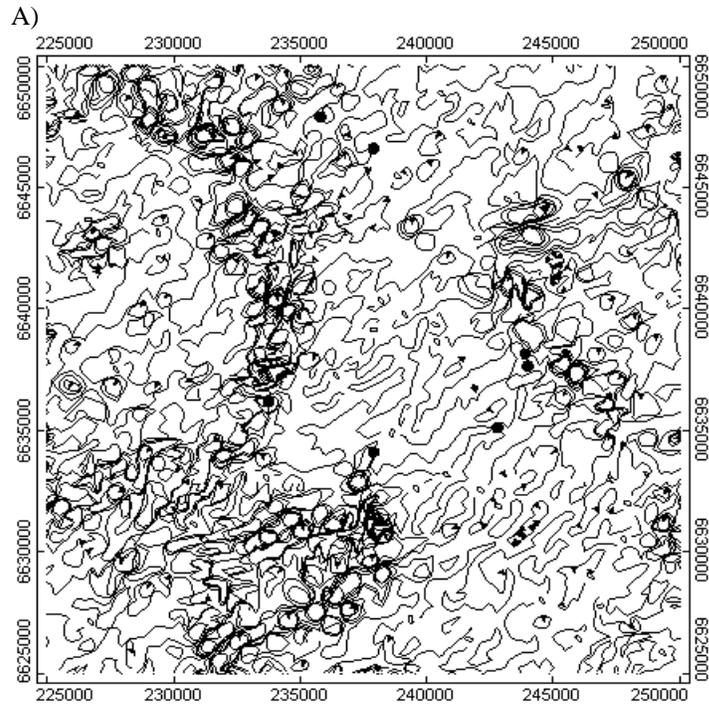


Figura 2. Mapas aeromagnetométricos da região do Complexo Bossoroça. A) Segunda derivada vertical com intervalo de 0.0001 nT e B) Integral vertical em Z com intervalos de 10000 nT.

Simbologia

- Ocorrências auríferas



## The calibration technical improvements of the recent ground concentrations airborne radiometric surveys conducted by CPRM - Serviço Geológico do Brasil

Luís Marcelo Fontoura Mourão, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, [mourao@cprm.gov.br](mailto:mourao@cprm.gov.br)  
Cesar Marinho Costa, LASA Engenharia e Prospecções, [cesar@fugroairborne.com.br](mailto:cesar@fugroairborne.com.br)

### A s r a

This paper aims at presenting the enhancements that CPRM - Serviço Geológico do Brasil has been performing in its new calibrated airborne radiometric projects over Precambrian basement terrains since 1997.

The referred airborne radiometric data, which are converted from counts per second (cps) to ground concentrations (% K, ppm eU, ppm eTh and microRoentgen/h for the total count channel) play a conspicuous role in geological mapping, mineral exploration, land use and environmental control, besides being the only technical way to link contiguous surveys.

All the new CPRM – Serviço Geológico do Brasil's airborne radiometric projects follow the calibration procedures recommendations of the Technical Reports Series no. 323 (Section 4) of the International Atomic Energy Agency (IAEA, 1991), as below:

- 1) Radar Altimeter Calibration (RAC);
- 2) Barometric Pressure Calibration (BPC);
- 3) Transportable Calibration Pads (TCP);
- 4) Cosmic and Aircraft Backgrounds (CAB);
- 5) Upward Detector Calibration (UDC);
- 6) Dynamic Calibration Range (DCR).

The last calibration procedure (*Dynamic Calibration Range*) will be here stressed since CPRM - Serviço Geológico do Brasil was in charge of finding out the best place in Brazil in accordance with IAEA's specific technical requirements, based on the radiometric digital data recorded in CPRM database named AERO. An excellent *dynamic calibration range* was initially chosen near Rio de Janeiro city, but it could not be used owing to military restrictions. The second better option was a place located in Inoã district, Maricá County, in the state of Rio De Janeiro, Brazil, the only reference in South America nowadays. It is not the ideal *dynamic calibration range* but it is the possible one owing to the choice restrictions. Therefore, the average of the Maricá dynamic calibration range ground concentrations for two tests performed for CPRM-Serviço Geológico do Brasil's surveys will be presented. The other

mentioned calibration procedures are related to the airborne geophysical survey contractors' obligations.

### In r n

These cited radiometric calibration techniques in Brazil were possible as part of CIDA (Canadian International Development Agency) sponsored *Canada-Brazil Cooperation Project for Sustainable Development in the Minerals Sector (CIDA project 204/13886)*, whose project proposal *Application of Compilation, Processing and Back-Calibration Techniques to the Production of Airborne Radiometric Maps of Brazil* generated the *Brazil Airborne Radiometric Mapping Project (BARMP)*, a contract celebrated between CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Geological Survey of Canada (GSC) and Paterson, Grant & Watson (PGW) in 1996 with the scope of levelling and linking all the Brazilian existing old airborne radiometric surveys. From 1997 until 2001 five new calibrated radiometric surveys (one with 1 km line spacing and the others with 500 meters line spacing) have been sponsored by CPRM - Serviço Geológico do Brasil with LASA Engenharia e Prospecções S.A. as contractor for the data acquisition and data processing (*for this task the Geosoft™ radiometric software called Oasis-RPS was used*), totalling 271236 km of profiles in an area of about 166100 km<sup>2</sup> in the Amazon region. The final products have been considered of excellent quality, mainly owing to the high resolution satellite navigational positioning.

### T e a a

The one second sampling time of an airborne radiometric data are recorded in counts per second (cps) along flight lines and tie lines. The surveys are carried out with different downward and upward NaI detector crystal volumes and flying heights.

### A r r n e a n r n r a e r a e r a r a n s s e

In a short way, the six mentioned calibration procedures are presented, as follows:

# T e a r a n e n a r v e e n s C P R M a r r n e r a e r s r v e s

## 1) Radar Altimeter Calibration (RAC)

The new radar altimeter calibration system provides a digital output of the aircraft terrain clearance, which can be recorded directly.

## 2) Barometric Pressure Calibration (BPC)

As the gamma ray window count rates depend on temperature and pressure, for each fiducial point, the pattern height ( $h_p$ ) (terrain clearance) is calculated as follows:

$$h_p = h (273.15 / T + 273.15) \times (P / 1013.25), \text{ where:}$$

$h$  = the observed terrain clearance in meters;

$T$  = the measured air temperature in degrees C;

$P$  = the barometric pressure in millibars.

## 3) Transportable Calibration Pads (TCP)

This must be the first airborne and ground (portable) radiometric calibration system procedure, which consists of four 100 cm x 100 cm x 30 cm transportable calibration pads (with known K, U, Th and background concentrations), that are located below each airborne crystal package aiming at determining the Compton scattering coefficients ( , , , a, b and g). Theoretically the spectra of potassium, uranium and thorium series overlap. Due to this, each spectral window, which is used to detect one radioelement, will contain some interference in the other two radioelements. The correction for one spectral overlap is named *stripping*.

Due to Compton scattering in the ground, some counts from high energy thorium source will be observed in the lower energy potassium and uranium windows. Counts in the lower energy windows can also arise from the incomplete absorption of 2.615 keV photons in the detector or from lower energy gamma-ray photons in the thorium decay series.

The Compton scattering coefficients are as follows:

is the thorium into uranium stripping ratios;

is the thorium into potassium stripping ratios;

is the uranium into potassium stripping ratios;

a is the reversed stripping ratios, uranium into thorium;

b is the reversed stripping ratios, potassium into thorium;

g is the reverse stripping ratios, potassium into uranium.

The mentioned four transportable calibration pads belong to LASA Engenharia e Prospecções S.A., the concentrations of which are informed in the Final

Report of CPRM - Serviço Geológico do Brasil's new surveys.

## 4) Cosmic and Aircraft Backgrounds (CAB)

The count rates due to cosmic radiation increase exponentially with height above mean sea level in all spectral windows. No terrestrial gamma rays have energies above 3 MeV. The count rates in the cosmic ray window (3 to 6 MeV) are related to counts due to cosmic radiation in various spectral windows by the following linear function:

$$N = a + bC, \text{ where:}$$

$N$  = the count rate in the given window;

$a$  = the aircraft background count rate for the particular window;

$b$  = the cosmic stripping ratio, the counts in the given window per count in the cosmic window;

$C$  = the cosmic window count rate.

A suitable series of flights over sea level (at 500, 1000, 2000, 3000, 4000 and 5000 feet, taking 15 minutes each altitude) should be done at a distance about 50 km away from the coast. Ideally, the cosmic flight should be performed when/where there is little or no airborne radon present.

## 5) Upward Detector Calibration (UDC)

An upward looking detector crystal consisting of two crystals of 256 cubic inches each, totalling 512 cubic inches, is used for monitoring (range between 1.66 to 1.86 MeV, the same of uranium - Bi214) the radon influence, which is a gas that can diffuse from the ground into the atmosphere, whose rate of diffusion depends on such factors as air pressure, soil moisture, ground cover, wind and temperature. It is therefore essential to measure and correct for the effects of atmospheric radon.

After removal of cosmic and aircraft backgrounds from the data collected over water, only the radon component remains in the various windows, which should be subtracted from K, U and Th downward crystals window count rates. Details on the corrections procedures for eliminating radon influence can be seen in the cited IAEA Technical Reports Series no. 323.

## 6) Dynamic Calibration Range (DCR)

A dynamic calibration range serves to calculate height attenuation coefficients for each window, as well as to calculate K, U, Th and total count sensitivity coefficients (counts per second / unit

## T e a r a n e n a r v e e n s C P R M a r r n e r a e r s r v e s

concentrations) for any particular airborne radiometric survey nominal terrain clearance. Taking into account broad sources are the most common source type in the geological environment, one measures the sensitivity over a broad source with known concentrations of K, U and Th. According to the IAEA guidelines (IAEA, 1991), a dynamic calibration range should have the following features:

- a) Be relatively flat;
- b) Have uniform concentrations of K, U and Th;
- c) Be close to a body of water for the measurement of background;
- d) Be free of flight restrictions;
- e) Be readily accessible for surface measurements;
- f) Be easy to navigate;
- g) Be about 8 km long, equivalent to about 150 seconds flying time at 50m/s;
- h) Have no hills within about 1 km of the flight line.

In accordance with the document entitled *A Guide to the Technical Specifications for Airborne Gamma-ray Surveys* (Grasty, R.L. & Minty, B.R.S., Australian Geological Survey Organization - AGSO, 1995), the recommended minimum concentrations for a calibration range should be: 1% for K, 3 ppm for U and 6 ppm for Th. The ground concentrations of a dynamic calibration range should be recorded with a calibrated portable spectrometer (which must be calibrated on the portable calibration pads each 12 months) on the same day of the test flights performed over the dynamic calibration range in order to avoid daily soil moisture variations.

A series of flights at different terrain clearance over the dynamic calibration range are carried out to determine height attenuation coefficients and to predict the sensitivity coefficients of each window at any survey nominal height for the conversion to apparent radioelement ground concentrations, as follows:

### a) Height attenuation correction

The stripped count rates vary exponentially with aircraft terrain clearance. Therefore, the measured count rate is related to the count rate at the nominal survey height according to the equation:

$$N_{\text{corr}} = N_{\text{obs}} e^{-\mu(h_o - h)}, \text{ where:}$$

$N_{\text{corr}}$  = the count rate normalized to the nominal survey terrain clearance,  $h_o$ ;

$N_{\text{obs}}$  = the background corrected, stripped count rate at height  $h$ ; and

$\mu$  = the attenuation coefficient for that window.

### b) Conversion to apparent ground concentrations

After all the airborne count rate (counts per second) data corrections, they can be used to estimate the ground concentrations of the three radioelements, potassium, uranium and thorium. The main advantage of this conversion takes into account all airborne data results are independent of survey variables such as crystal volume and survey height, once the equipment was properly calibrated.

The corrected window count rate data should be converted to ground concentrations of potassium, uranium and thorium, according to the equation:

$$S = N / C, \text{ where:}$$

$S$  = broad source sensitivity for the window;

$N$  = airborne count rate average for each window, after background, stripping and height corrections;

$C$  = ground concentration average of the radioelement (%K, ppm eU, ppm eTh) after background corrections

The ground level *exposure rate* (E) for total count channel can be calculated from the apparent ground concentrations (%K, ppm eU, ppm eTh), using the expression:

$$E = 1.505K + 0.653eU + 0.287eTh \text{ (in R/h)}$$

## B r a n a r a n r a n e I n s r , M a r n , s a e R e a n e r

The CPRM - Serviço Geológico do Brasil's Division of Cartography, based on the request of Division of Geophysics, built the *Maricá Dynamic Calibration Range* during November 07 to 11, 1997. The initial and final geographic and UTM coordinates (Horizontal Datum: SAD-69/Central Meridian: -45°) are:

*Initial latitude/Longitude:* - 22° 56' 16.50356" / - 42° 56' 30.67162";

*Initial UTM coordinates:* 7,461,866.173m N / 711,050.943m E;

*Final latitude/Longitude:* - 22° 53' 47.34927" / - 42° 54' 50.62369"

*Final UTM coordinates:* 7,466,414.560m N / 713,966.714m E.

Details on the topographic and geodetic survey procedures of the referred dynamic calibration range can be seen in the document called *Relatório sobre os Serviços de Geodésia e Topografia para Locação da Linha de Calibração Dinâmica*, Ministério de Minas e Energia, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Edição revisada, 1999.

For all the CPRM – Serviço Geológico do Brasil's

# T e a r a n e n a r v e e n s C P R M a r r n e r a e r s r v e s

airborne radiometric surveys the data are recorded each 50 meters along the dynamic calibration range with an integration time of 100 seconds through one portable gamma spectrometer.

Figure 1 shows the location map of state of Rio de Janeiro, where the Maricá dynamic calibration range is located.

Tables 1 and 2 present the results obtained on the referred range in the first new two CPRM-Serviço Geológico do Brasil's airborne radiometric surveys.

## C n s n

Although the *Maricá Dynamic Calibration Range* does not present the best performance, there is a good radiometric correlation between the results as informed by Table 1 (data recorded in November, 1997) and Table 2 (data recorded in June, 1999).

## Re eren es

- 1) AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, Airborne Magnetic and Radiometric Surveys, Volume 17, Number 2, 1997.
- 2) CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Ministério de Minas e Energia, Relatório sobre os Serviços de Geodésia e Topografia para Locação da Linha de Calibração Dinâmica, Edição Revisada, 1999.
- 3) Grasty, R.L. & Minty, B.R.S., A Guide to the Technical Specifications for Airborne Gamma-Ray Surveys, Australian Geological Survey Organization-AGSO, 1995.
- 4) IAEA-International Atomic Energy Agency, Airborne Gamma-ray Spectrometer Surveying, Technical Reports Series no. 323, Vienna, 1991.
- 5) PGW-Paterson, Grant & Watson Limited, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, GSC-Geological Survey of Canada, Brazil Airborne Radiometric Mapping Project (BARMP), 1997.



Figure 1- Location Map of State of Rio de Janeiro

## 1. PROJETO PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS

### a) Radiometric Airborne Data (68 Fiducial Points)

STATISTICS	TC (cps)	K (cps)	U (cps)	Th (cps)
Count Average of Profile	2461,23	136,87	18,88	120,94
Standard Deviation	175,70	17,98	7,59	8,15
Error on Average (%)	21,31	2,18	0,92	0,99
Uncertainty (%)	0,86	1,59	4,87	0,82

Error on Average = Standard Deviation / (Number of Fiducials)<sup>1/2</sup>  
 Uncertainty = Error on Average / Count Average  
 Background, Stripping and Height Attenuation Corrected

### b) Field Data (67 stations)

STATISTICS	GROUND CONCENTRATION			
	TC ( R/h)	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
Average	15,45	2,37	3,78	32,81
Standard Deviation	-	0,70	0,98	8,96
Error on Average (%)	-	0,09	0,12	1,09
Uncertainty (%)	-	3,60	3,20	3,30

### c) Sensitivity Coefficients

SENSITIVITY			
TC (cps/ R/h)	K (cps/%)	U (cps/ppm)	Th (cps/ppm)
159,30	57,75	4,99	3,69

Sensitivity = Airborne Data (cps) / Ground Concentration

Table 1 (17.11.1997)

## 2. PROJETO RESERVA NACIONAL DO COBRE - RENCA

### a) Radiometric Airborne Data (63 Fiducial Points)

STATISTICS	TC (cps)	K (cps)	U (cps)	Th (cps)
Count Average of Profile	2022,92	99,91	19,96	96,86
Standard Deviation	170,49	17,93	7,58	15,61
Error on Average (%)	19,43	2,04	0,86	1,78
Uncertainty (%)	0,01	0,02	0,04	0,02

Error on Average = Standard Deviation / (Number of Fiducials)<sup>1/2</sup>  
 Uncertainty = Error on Average / Count Average  
 Background, Stripping and Height Attenuation Corrected

### b) Field Data (62 stations)

STATISTICS	GROUND CONCENTRATION			
	TC ( R/h)	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
Average	24,03	3,06	3,97	58,65
Standard Deviation	-	1,25	1,38	16,62
Error on Average (%)	-	0,15	0,16	1,96
Uncertainty (%)	-	0,05	0,04	0,03

### c) Sensitivity Coefficients

SENSITIVITY			
TC (cps/ R/h)	K (cps/%)	U (cps/ppm)	Th (cps/ppm)
84,18	32,66	5,03	1,65

Sensitivity = Airborne Data (cps) / Ground Concentration

Table 2 (28.06.1999)



## THE PROBABILITY RATIO MAPPING TECHNIQUE: A NEW STATISTICAL APPROACH TO PREDICT LOCATIONS OF FAVOURABLE HOST ROCK MINERALIZATION

<sup>1</sup>Adalene Moreira Silva, <sup>2</sup>Anne E. McCafferty and <sup>1</sup>Augusto César B. Pires

<sup>1</sup>Laboratório de Geofísica Aplicada, Instituto de Geociências, UnB, Brasília, Brazil,

<sup>2</sup>USGS, Denver, USA

### Abstract

This paper focuses mainly the development of the probability ratio mapping technique and its application on predicting the distribution of Archean greenstone-hosted gold deposits in the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero. The probability ratio models use the spatial distribution of host rocks and mineral occurrences to calculate different multi-map signatures for gold mineralization.

The ability of the models to predict regions favorable for economic gold mineralization was verified by comparing them with the occurrences of Archean-greenstone-hosted gold deposits and host rocks. Several models that delineate highly prospective areas were determined. From the regional perspective, the predictive geophysical models convincingly define the majority of host rocks. Most importantly, the predictive models generated for the different mineralized environments delineate prospective areas mapped outside the known mines. These areas have the potential to contain similar mineralization.

### Introduction

The Rio das Velhas Greenstone Belt, located in the Quadrilátero Ferrífero region in the southeastern from Brazil, accounts for over 1000 tons of past gold production and current reserves for Archean-greenstone-hosted mineralization. The region is marked by a complex multi-phased history, which resulted in the heterogeneous superposition of successive tectonic events.

An empirical modeling approach was used to locate zones that are favorable for gold mineralization in Rio das Velhas Greenstone Belt. Quantitative relationships between airborne geophysical and known deposits were determined using probability ratio analysis. Spatial associations among geophysical data, host rocks and mines were combined to produce predictive models to explore for Archean greenstone-hosted deposits.

The purpose of the probability ratio method is to use the airborne geophysical data to determine whether or not there exists a characteristic signature over a deposit with a known high potential for gold

mineralization. Probability ratios are given as weights that describe how strong a spatial association the test data layer (magnetics, electromagnetics, and radiometrics) has with the training area (host rock or mine). The larger the weight, the stronger the spatial association.

This approach has shown great capability for linking geological and geophysical interpretation. The results of this modeling map the known mineralized environments, as well delineate other prospective areas that share the same geophysical signatures. The results are important to gold exploration in the area and can direct new ways for mineral prospecting in the Rio das Velhas Greenstone Belt.

### GEOLOGIC OVERVIEW

The QF is situated in the southern portion of the São Francisco Craton and is composed of Archean granite-gneissic terrains (GGTs); Archean Greenstone Belt (Rio das Velhas Supergroup); Paleoproterozoic (Minas Supergroup and Itacolomi Group) and Paleoproterozoic-Mesoproterozoic (Espinhaço Supergroup) supracrustal units.

The supracrustal units, namely Minas and Rio das Velhas Supergroups, surround and are surrounded by granite-gneiss domes and each has been named: Bação, Caeté, Bonfim, Belo Horizonte and Santa Rita. These domes consist of poly-deformed gneiss, metatonalites to metagranites, amphibolites, meta-ultramafic rocks, as well as pegmatites formed in amphibolites facies conditions during the Archean and in the Tranzamazonian Eras (Cordani *et al.*, 1980). The contact with adjacent supracrustal units is tectonic.

The Rio das Velhas Supergroup (RVSG – 3.0-2.7 Ga) is divided in two groups. The first, Nova Lima Group (NLG) comprises a lower ultramafic unit, an intermediate felsic-mafic unit and a clastic-mafic-felsic unit (Ladeira, 1980). These rocks are overlain by quartzites of Maquiné Group.

## THE PROBABILITY RATIO MAPPING TECHNIQUE

In general, the probability ratio method determines a numerical value that describes the strength of a spatial association between a training area and a test class within a predictive layer. Values resulting from the analysis are called probability ratios or weights and describe the statistical likelihood that a particular layer will predict the location of a given training region. Weights greater than 1 indicate a positive association between the test class and the training region; a value less than 1 suggests a negative association; and a value equal to one implies a random association. For example, a weight of 12 for a class implies that class is 12 times more likely to be found within the reference area than in any other (non-reference) area in the study. The mathematical basis for the probability ratio technique is well described in Lee *et al.* (in press).

For this study, classes within the airborne geophysical and radiometric data are defined as predictive layers and tested against training areas defined by the mine environments and host rocks. Probability ratios are calculated to determine whether or not there exists a characteristic signature over the mineralized environment and geologic host with a known high potential for gold mineralization. We infer areas mapped outside the training areas share the same geophysical and radiometric signatures and would be likely candidates for gold mineralization.

## THE DATA SETS

A variety of regional data sets from Rio das Velhas Greenstone Belt have been registered and analyzed using a geographic information system (GIS). The data sets include Rio das Velhas Project geological map (reference), Rio das Velhas airborne geophysical survey data (airborne magnetic, radiometric and frequency domain electromagnetics), and terrain.

The data layers in this research were processed, analyzed and interpreted in specific software in order to obtain products that could be used in the probability ratio analysis. The processing steps and description of the derivative products produced from the various data layers in preparation for probability ratio mapping are described in Silva (1999).

The data sets were rescaled to values between 1 (low) to 255 (high) using a histogram equalization transformation also called uniform distribution stretching. This transform was chosen to meet the

objectives of this research, where less known areas with possibly less obvious signatures related to greenstone-hosted-gold deposits are being mapped from the various evidential data layers.

Rescaling the data before applying the probability ratio mapping method is not a requirement. The option to transform the data prior to modeling must be based on the knowledge of the exploration expert and the aim of the work to be developed. However, it is important not generalize the data to the point of losing important details which would restrain the inherent objectivity that the probability ratio method provides.

## THE PREDICTIVE MODELS

Predictive layers against which the training areas are tested and defined based on the following geologic and geophysical rationales: **a)** the mapped units, which are host to the several deposits, are used as a training area to predict other favorable host areas for gold mineralization; **b)** the location of mines and their associated mineralization are known and used as training areas for the geophysical and radiometric data; **c)** derivative products of magnetic anomaly data map positive magnetization domains and boundaries associated with the gold mineralization; **d)** conductivity domains map and **e)** the potassium data map areas of potassic enrichment attributed to hydrothermal alteration related to the gold mineralization (Silva 1999).

## MODEL CONSTRUCTION

Predictive models for favourable host rocks and mineralized environments were generated for this study using the sum-of-weights approach. Co-registered pixels were added to create composites of multiple layers of geophysical and radiometric information. Only those pixels with probability ratios greater than 2 were considered for incorporation into final models. Additionally, each pixel present in final models that incorporated more than one evidential layer represents a either sum of probability ratios between multiple data layers or null values. For this reason, the minimum weight for any predictive model is 4 (2 + 2). For example, for pixels where there is a probability ratio for conductivity but not for magnetization, these pixels are assigned a null value. The final product is a favorability map showing known and potential areas of either favourable host rock lithologies or greenstone-hosted gold mineralization (Silva, 1999; Silva *et al.* 1999).

Training areas with circular buffers around the mine locations (radius of 500-, 1000-, and 2000-

meters) were constructed to determine zones of influence with geologic, metallogenetic, and geophysical meaning (Figure 01). The various buffer sizes were individually evaluated to define an optimum buffer-radius that yielded maximum contrast to map the mineralized environments. The optimum distance was interpreted to be 500-m (Silva, 1999) and was selected not only for geologic but also due to geophysical constraints. Data from the airborne survey in this study were collected along flight lines spaced 250 meters apart. At a maximum, five flight lines could cross the 500-meter radius test area, which provides the minimum resolution in defining a spatial feature in the geophysical data.

The figure 01 presents an example of a predictive geophysical model for banded iron gold mineralization, oxide type, using the probability ratio mapping technique and based on derivative products of magnetization, conductivity and radiometric signature around Faria mine. Areas in color shows results of probability ratio mapping with weights from 10(ten) to 86(red). These areas define a strong association of high frequencies, structures, conductivity and potassium that is 10 to 86 times more likely to occur over the region around Faria mine than another area in the study area. The few areas mapped outside Faria mine have similar geophysical properties and mineralized environment as that found at Faria. Observe that the Faria mine signature follows the mapped banded iron formation, illustrating the real situation in field, as well shows the extension of the mineralized body in sub-surface.

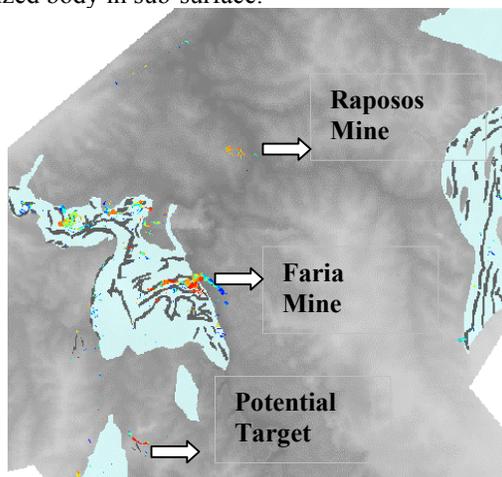


Figura 1- Example of a predictive geophysical model for banded iron gold mineralization, oxide type, using the probability ratio mapping technique. Cyan polygons are mapped Morro Velho Formation and gray strips shows the mapped oxide-banded iron formation.

## DISCUSSIONS, TARGETING CONCEPTS AND CONCLUSIONS

This paper focuses mainly on development of the probability ratio mapping technique and its application on prediction of the distribution of Archean greenstone-hosted gold deposits in the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero. The probability ratio models use the spatial distribution of host rocks and mineral occurrences to calculate different multi-map signatures for gold mineralization.

The ability of the models to predict regions favorable to gold mineralization was verified by comparing them with the occurrences of Archean-greenstone-hosted gold deposits and host rocks (Silva, 1999; Silva et al. 1999). Several models that delineate highly prospective areas were determined. From the regional perspective, the predictive geophysical models convincingly define the known host rocks. Most importantly, the predictive models, generated for the different mineralized environments, delineate prospective areas different from those in which are the known mines. These areas have the potential to contain similar mineralization.

The predictive models lead to a consideration about the future mineral exploration efforts in the Rio das Velhas Greenstone Belt. The characterization of favorable host rocks and several of the large current and past-producing gold mines in the area provide tools for this discussion. If the veracity of these predictive models is ground truthed and confirmed, then the results will help to conduct new exploration activities in the region. This approach should consider high-potential host rocks, such as extension areas of highly prospective nature and potential targets mapped by this technique.

Data-driven methods are not always applicable in poorly explored regions (the opposite of the Rio das Velhas Greenstone Belt) and, if used, the results must be interpreted with caution. This problem can be remedied by improving the analysis with new data that will increase the knowledge of the study area and point out areas for exploration follow up. Following this, the probability ratios and their predictive models can contribute to find undiscovered deposits.

The probability ratio mapping technique can be used for different applications, such as environmental studies, assessments to hydrologic problems, water quality, and landslide potential. The initial effort involves understanding the problem, then preparing the data for modeling. Setting limitations and establishing rules for map combination occurs throughout the process. Automating processes like

this can provide a tool for developing a variety of scenarios and allow alternatives to test exploration ideas. The modeling process is slow and laborious to make if there is not integration with the field geologists and can appear a black box if there is no understanding of the modeling rationale.

## References

- Bonham-Carter, G.F.; 1994. Geographic information system for geoscientists – Modeling with GIS. Pergamon, 398p.
- Cordani, U.G.; Kawashita, K.; Mueller, G.; Quade, H.; Reimer, V.; Roeser, H.P. 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento do bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Acad. Bras. Cienc., Anais...Rio de Janeiro, 52:785-799.
- Ladeira, E.A. 1980. Metallogenesis of Gold at the Morro Velho Mine, and in Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. London. 272p. (Ph.D. thesis, University of Western Ontario).
- Lee G.K., McCafferty A.E., Alminas H.V., Bankey V., Elliot J.E., Frishman D., Knepper D.H.Jr., Kulik D.M., Marsh S.P., Phillips J.D., Pitkin J.A., Smith S.M., Stoesser D.B., Tysdal R.G., Van Gosen B. in press, Geoenvironmental assessment of Montana: United States Geological Survey Digital Data Series DDS-x.
- McCafferty A.E., Smith B.D., Sole T.C., Karl S., Taylor C.D. in press. Predictive Geophysical Models For Select geologic units and mineralized environments, Kuprenof and Zarembo Islands, Southeast Alaska: United States Geological Survey Professional Paper PP-x.
- Ribeiro-Rodrigues L.C. 1998. Gold Mineralization In Archaean Banded Iron Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - The Cuiabá Mine. Rwth Aachen, Germany, Aachener Geowissenschaftliche, Tese de Doutorado, 262p.
- Silva, A.M. 1999. Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 195p.
- Silva A.M., McCafferty A.E. & Pires A.C.B. –1999 - A new approach to map host rock for gold exploration in the Rio Das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Proceedings of The 6<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 1999, CD.

## Acknowledgments

The first author would like to thank CAPES/Brazilian Government for concession of PhD scholarship and also DNPM, CPRM, USGS and Colorado School of Mines for the support in this research. We are grateful to Gregory Lee (USGS) and Tracy Sole Van De Hoop (USGS), for their enormous help in data processing and discussions during the course of this work.



## Visualização de dados de aerogamaespectrométricos da Região dos Lagos (RJ). Relações com a geologia e processos de superfície.

*José Ribamar Silveira da Silva, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil, [jribamar@on.br](mailto:jribamar@on.br)*

*Jean-Marie Flexor, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil, [flexor@on.br](mailto:flexor@on.br)*

*Luiz Heitor Drehmer, Departamento de Geologia, UFRJ, [drehmer@nce.ufrj.br](mailto:drehmer@nce.ufrj.br)*

### Introdução

Levantamentos radiométricos aéreos efetuados concomitantemente com levantamentos aeromagnéticos tem sido uma ferramenta importante no mapeamento geológico e na exploração de recursos minerais. Os dados gamaespectrométricos permitem medir a distribuição dos elementos radioativos naturais da crosta terrestre através da radiação gama emitida pelo decaimento do urânio, tório e potássio-40. Estudos recentes (Dickson et al, 1996) mostraram que há uma relação entre as concentrações daqueles radioelementos numa grande variedade de rochas e os processos de intemperismo, erosão e sedimentação. Óxidos de ferro e argilas têm um papel importante na retenção do Th em materiais alterados de rochas máficas. Uma representação particularmente eficiente para o estabelecimento de relações entre a distribuição da radioatividade superficial e as formações geológicas consiste no drapejamento das cartas de isovalores (U, Th, K, U/Th, U/K e Th/K) sobre o modelo digital de terreno. Assim, conhecendo os mecanismos geológicos, geomorfológicos, ambientais, etc. que podem estar associados às anomalias na distribuição espacial dos parâmetros acima, os processos são pois suscetíveis de ser quantificados e eventualmente modelados.

### Região dos Lagos (RJ) – Geologia

O Domínio Região dos Lagos da Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro representa o domínio mais oriental da Província da Mantiqueira. Além das províncias pré-cambrianas, a região engloba parte da Província Costeira bem como sua Margem Continental. Essas duas unidades englobam bacias continentais terciárias e suas correspondentes submersas, desenvolvidas a partir do Jurássico, a Bacia de Campos. Caracteriza-se também por extensivo magmatismo alcalino. Nota-se o desenvolvimento de formações superficiais terciárias e quaternárias continentais e os sedimentos quaternários da plataforma continental. O Complexo Região dos Lagos (P<sub>1</sub>rl) é constituído por ortognaisses bandados/dobrados, cinzentos, de composição tonalítica a granítica, com abundantes paleo-

diques anfibolíticos deformados. Aparecem ainda as formações seguintes: Suite Desengano (N 2d – Granito tipo-S com granada, muscovita e biotita de granulção grossa, texturas granoblástica e porfírica (augen) com forte foliação transcorrente); Complexo Búzios (MNb-Cianita-sillimanita-granada-biotita xisto e gnaiss quartzo-feldspático intercalado com granada anfibolito e gnaiss calcissilicático. Fusão parcial com formação de leucogranito granadífero ocorre regionalmente. Nos domínios com baixa taxa de estruturas turbidíticas são preservadas); Complexo Paraíba do Sul (MNps-Granada-biotita-sillimanita gnaiss quartzo-feldspático (metagrauvaca), com bolsões e veios anatéticos ou injetados de composição granítica. Intercalações de gnaiss calcissilicático e quartzito frequentes. Variedades com cordierita e sillimanita (kinzigito) com contatos transicionais com o granada biotita gnaiss. Horizontes de xistos grafitosos são comuns. Também ocorrem rocha calcissilicática, metacarbonática (ca) e quartzito (qz); Rochas alcalinas cretácicas/terciárias (KT) – Maciço Alcalino de Tanguá (KT ta); Maciço Alcalino de Soarinho (KT so); Maciço Alcalino de Rio Bonito (KT rb); Granitóides pós-tectônicos (5 – Granito Sana(11), Granito São Pedro (1), Granito São José do Ribeirão (2), Granito Alvim Cesário (15), Granito Silva Jardim (17) e Granito Nova Friburgo(9). Os depósitos quaternários são expressivos na região. Caracterizam-se pelos depósitos colúvio-aluvionares (Qha) e depósitos de restinga (Qphr).

### Tratamento dos dados aerogamaespectrométricos.

Foram utilizados dados radiométricos do Projeto Aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro. Este levantamento realizado em meados de 1978 foi recentemente objeto de uma nova calibração transformando taxas de contagem (cps) em concentrações de K(%) e ppm eU (equivalente de urânio) e eTh (equivalente de tório) (Mourão et al., 1997). As cartas de isovalores das concentrações e das razões foram construídas com o auxílio do programa GEOSOFT-OASIS

## Visualização de dados de espectrometria-gama aérea da Região dos Lagos (RJ). Relações com a geologia e processos de superfície.

MONTAJ 5.0.7. O modelo digital de terreno da área estudada foi gerado a partir dos dados das cartas topográficas rasterizadas e posteriormente vetorizadas com a ajuda do programa ARCVIEW 3.5. As representações obtidas são geo-referenciadas o que permitiu verificar posteriormente a precisão do posicionamento das aeronaves utilizadas no levantamento efetuado em 1978.

### Resultados obtidos. Discussão.

Foram obtidas representações da distribuição das concentrações de K, Th e U ( figs.2, 3 e 4) bem como das razões U/Th, K/U e Th/K drapejadas sobre o modelo digital de terreno da Região dos Lagos. O significado das anomalias é tentativamente associado com feições do mapa geológico (Fig. 1) (CPRM, 2001). As concentrações de potássio variaram entre 0,2 e 3,2% K e as anomalias mais expressivas estão associadas à Suite Desengano (N 2d), Unidade Rio Negro – Gnaiss Tinguí (N 1rt); granitóides pós-tectônicos: Granito Silva Jardim (17), Granito Alvim Cesário (15), Granito Sana (11), Granito São Pedro(2), Granito São José do Ribeirão (9) e Granito Nova Friburgo (9). As intrusivas alcalinas mesocenozóicas do Maciço Alcalino de Rio Bonito (KT rb), do Maciço Alcalino Soarinho (KT so) e Maciço Alcalino do Tanguá (KT ta) contribuem para o elevado sinal de potássio nesta zona. Os vales aluviais dos Rios Capivari, Rio Bacaxá e Rio Pardo que desembocam na Lagoa de Juturnaíba mostram uma concentração expressiva de potássio que deve estar associado com o aumento no teor em argilas e portanto com processos sedimentares.

As concentrações de tório variaram entre 4,5 e 42,2 ppm eTh. As anomalias mais expressivas (cerca de 40 ppm e Th) correspondem às feições geológicas associadas aos granitóides pós-tectônicos: Granito Silva Jardim (17) e Granito Alvim Cesário e à Unidade Rio Negro – Gnaiss Tinguí (N 1rt). Os vales aluviais associados à Lagoa de Juturnaíba apresentam também altas concentrações de tório. Sua insolubilidade bem como o seu alto poder de adsorção em material particulado o tornam particularmente indicado para traçar processos sedimentares do tipo coluvionar.

As concentrações de urânio são bastante baixas variando entre 1,1 e 5,6 ppm eU. A sua distribuição é muito mais disseminada do que a do tório devido à sua alta mobilidade de modo que não é um bom indicador a não ser no caso de mineralizações. Entretanto processos aluvionares mostram anomalias detectáveis das concentrações de urânio.

### Referências

- Dickson L.B., Fraser S.J., Kinsey-Henderson A., 1996. *Interpreting aerial gamma-ray surveys utilizing geomorphological and weathering models. Journal of Geochemical Exploration* 57, pp:75-88.
- Mourão L.M.F., Monteiro A.C., dos Anjos I.L.S., Escobar I.P., Sinclair R., Grasty R.L. "Aplicação da técnica de "back-calibration" no Brasil para conversão de dados aerogamaespectrométricos de cps para concentração de elementos" Atas do V Simpósio de Geologia do Sudeste, Penedo, Itatiaia –RJ, 09 a 12 de dezembro de 1997, pp:331-333.
- CPRM. *Geologia do Estado do Rio de Janeiro. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*, (Silva L.C., Silva Cunha H.C., organizadores) Brasília, 2001.

Visualização de dados de espectrometria-gama aérea da Região dos Lagos (RJ). Relações com a geologia e processos de superfície.

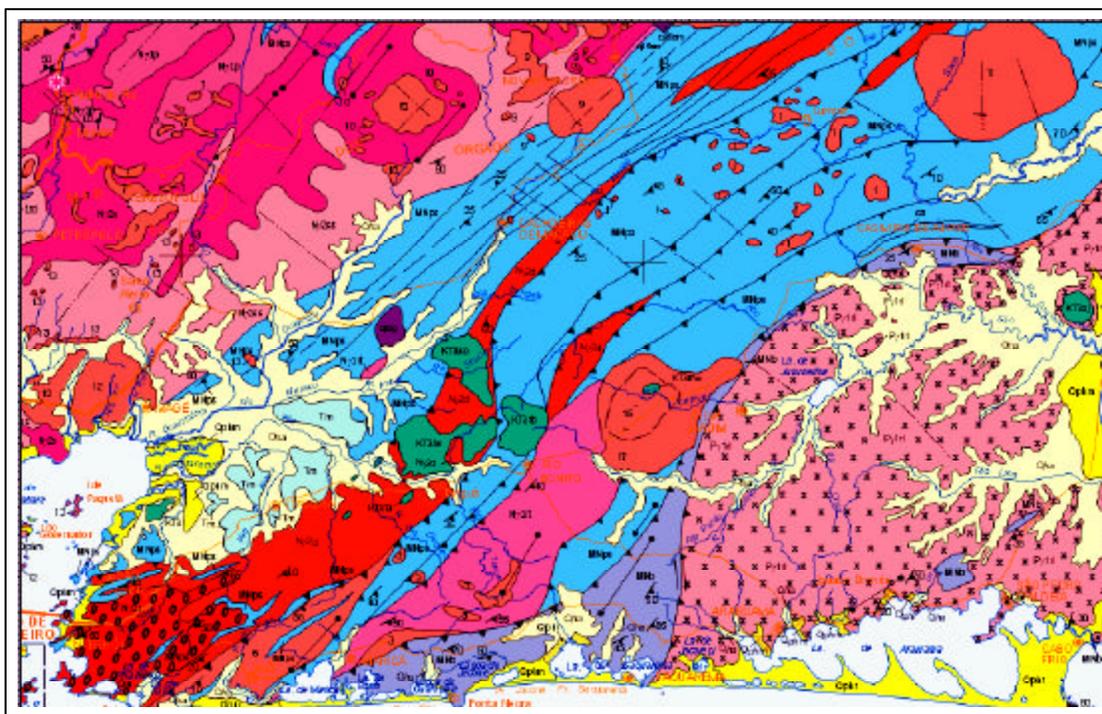


Figura 1. Mapa geológico da Região dos Lagos e adjacências

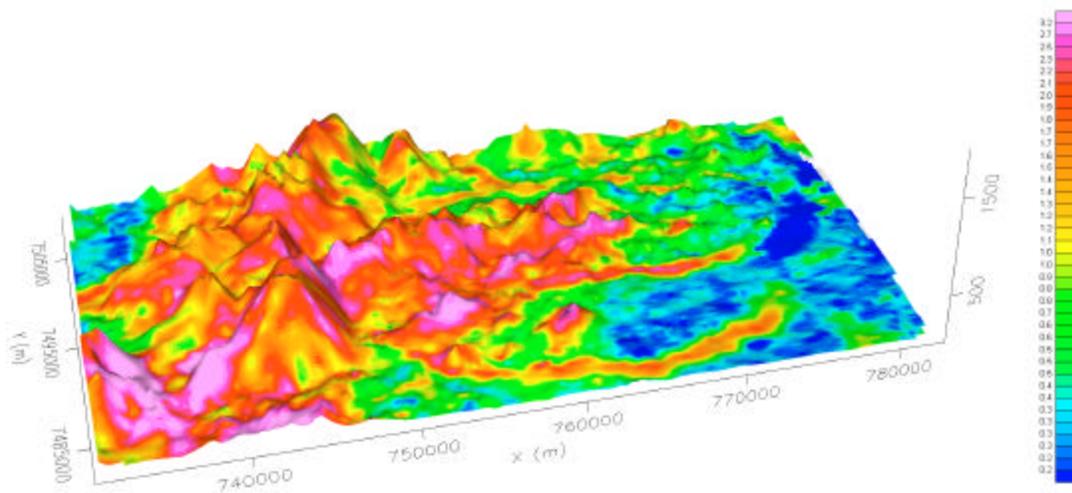


Figura 2 Concentrações de potássio.

Visualização de dados de espectrometria-gama aérea da Região dos Lagos (RJ). Relações com a geologia e processos de superfície.

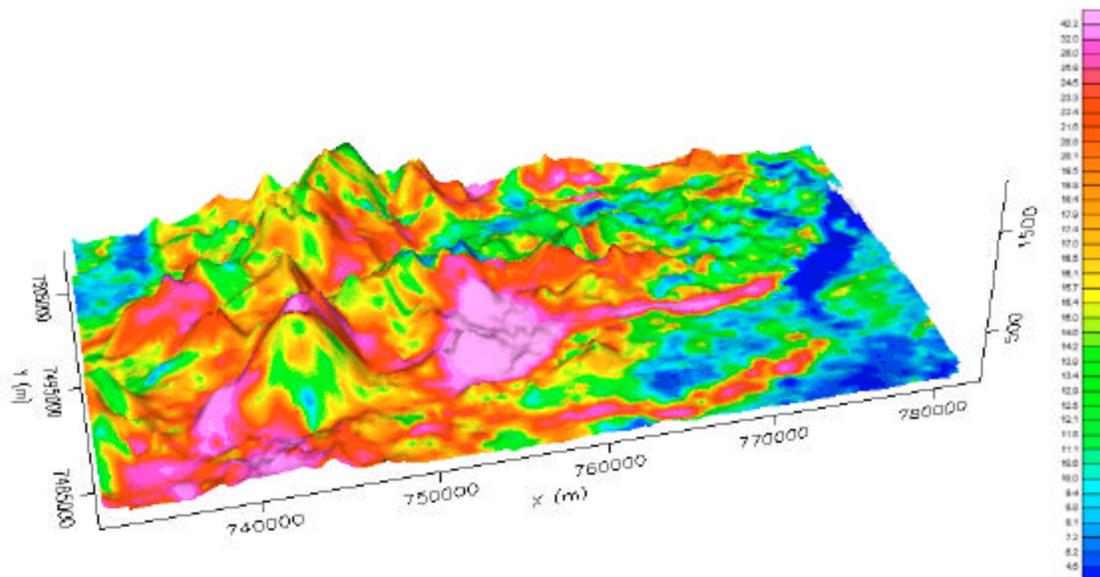


Figura 3 – Concentrações de Tório.

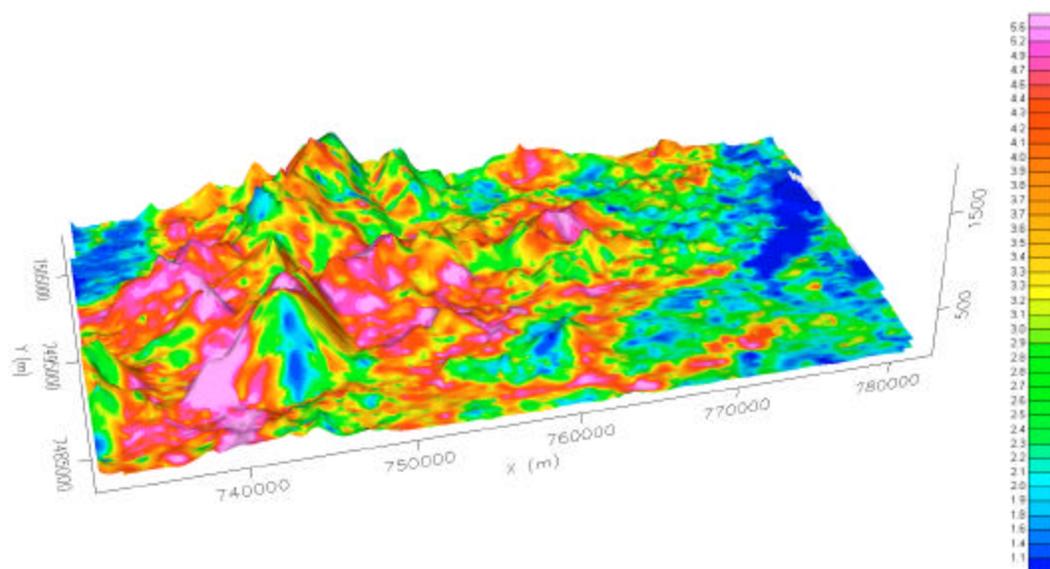


Figura 4 – Concentrações de urânio.