



## Identificação de estruturas geoeletricas tri-dimensionais no Bloco Serrinha, Bahia, a partir de estudos de indução eletromagnética

Marcelo Furlan (UNICAMP); Ícaro Vitorello (INPE); Marcelo B. de Pádua (INPE); Elson Paiva de Oliveira (UNICAMP)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

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

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

**Magnetotelluric (MT) data are collected over a 150 km long profile in SE of the São Francisco craton, extending from Gavião block (arquean), Itabuna-Salvador-Curaçá orogen (paleoproterozoic), Serrinha block (mesoarquean host rocks and paleoproterozoic rocks of greenstone belt of Rio Itapicuru) and Tucano Basin. The results of broad-band MT data shows regions where the phase surpasses 90 degrees, indicating a 3D source for both modes of propagation of electromagnetic waves (TE and TM modes). This craton represents an important area of study once that are known minerals areas (e.g. Au, Cu, Cr), in addition to the fundamental participation in tectonic evolution. Future 3D inversions of MT data could contribute to the better definition of geometry features these regions anomalous, contributing to better understanding of tectonic and magmatic process events that occur there are millions of years ago.**

### Introdução

O foco desta pesquisa é compreender a estrutura crustal e litosférica da porção nordeste do cráton do São Francisco (CSF) a partir de dados magnetotéluricos (MT). O método MT tem como objetivo mapear a distribuição de resistividade elétrica do interior do planeta baseando-se nas medidas simultâneas das variações temporais das componentes ortogonais dos campos magnético ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) e elétrico ( $E_x$  e  $E_y$ ) medidas na superfície terrestre.

Com tais propósitos de investigação, aquisições magnetotéluricas foram realizadas nesta porção do cráton pelo Grupo de Pesquisa em Geomagnetismo da Divisão de Geofísica Espacial do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e totalizaram 37 estações ao longo de quatro perfis, somando aproximadamente 500 km de extensão mapeada. Neste resumo serão apresentados resultados preliminares do **Perfil B** (Fig. 1), contendo 13 estações MT ao longo de 150 km de extensão. As localizações das estações MT foram planejadas para abrangerem informações de quatro unidades geológicas distintas: (i) coberturas fanerozóicas das Bacias Tucano-Recôncavo; (ii) embasamento mesoarqueano do Bloco

Serrinha e rochas paleoproterozóicas do *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru (GBRI); (iii) rochas paleoproterozóicas de alto grau metamórfico do Segmento Norte do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá (OISC); (iv) terrenos gnáissicos arqueanos do Bloco Gavião, com maior densidade de estações nas regiões do bloco Serrinha e da porção norte do OISC.

As zonas cratônicas pré-cambrianas tornaram-se alvos de intensas investigações em diversas partes do mundo. Essas regiões do planeta são conhecidas por serem portadoras de concentrações minerais indispensáveis para as economias modernas. No cenário nacional observou-se um intenso movimento de importantes pesquisas em terrenos pré-cambrianos, notadamente no CSF, que constitui o segmento da crosta continental antiga mais acessível da América do Sul (II Simpósio Sobre o Cráton do São Francisco, Salvador, Bahia, 1992). Além da importante riqueza em termos de recursos minerais e energéticos associados ao CSF e suas faixas de dobramentos marginais, essas regiões podem resguardar assinaturas geofísicas de grande relevância para a reconstrução de eventos magmáticos e tectônicos que ocorreram entre os diversos blocos litológicos que constituem essa antiga porção continental. Entretanto, a região ainda carece de estudos geofísicos mais avançados que possibilitem a investigação das estruturas profundas que lá existem atualmente.

Neste resumo são apresentados os resultados em curvas MT e pseudo-seções de fase. Eles mostram regiões do perfil onde a fase ultrapassa 90°, indicando uma fonte condutora 3D no Bloco Serrinha, identificado por ambos os modos de propagação da onda eletromagnética (TM e TE). A partir da representação de Niblett-Bostick (Jones, 1983) foi possível definir que para o modo TE, a anomalia é identificada a partir de 6 km de profundidade, chegando a profundidades de 40 km para o topo da anomalia, enquanto que para o modo TM, esse condutor é mapeado somente por uma estação e sua profundidade está por volta de 19 km. Futuras inversões 3D dos dados serão efetuadas com a finalidade de definir, de forma detalhada, as características geofísicas dessa anomalia.

### Contexto geológico

Os perfis MT cruzam leste-oeste os limites de quatro unidades com idades distintas: Bloco Gavião (~3.4 Ga); OISC (~2.6 Ga) (e.g. Oliveira et al. 2010); Bloco Serrinha (~2.9 Ga); Bacia do Tucano (~135 Ma) (e.g. Barbosa & Sabaté 2004; Oliveira et al. 2004). O Bloco Gavião localiza-se na porção central do cráton e é composto essencialmente por granitos, granodioritos, migmatitos, suítes TTG e sequências de *greenstone belts*. Essas rochas estão entre as mais antigas do continente Sul-Americano (~3,4 Ga). O Bloco Serrinha apresenta

importantes relações de campo que indicam intensos processos tectônicos. Essa região, no nordeste do estado da Bahia, é uma das mais bem estudadas do Pré-cambriano brasileiro, sobretudo porque lá são conhecidas várias mineralizações auríferas hospedadas em zonas de cisalhamento, além de corpos cromitíferos ultramáficos e micro-diamantes associados à kimberlitos. Esse núcleo arqueano é composto por ortognaisses e migmatitos, que representam o embasamento das seqüências paleoproterozóicas do *greenstone belt* do Rio Itapicuru. O Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá é composto principalmente por tonalitos/trondhjemitos, incluindo seqüências intercaladas de metassedimentos e basaltos/gabros de fundo oceânico e/ou bacias *back-arc* (Teixeira, 1997). A Bacia do Tucano é uma bacia intracratônica relacionada à fase *rifte* da abertura do Oceano Atlântico.

### Princípios básicos do Método MT

O método MT é uma técnica de exploração passiva e consiste na medição simultânea dos sinais elétrico e magnético na superfície terrestre para a obtenção de modelos das estruturas geoeletricas no interior do planeta. O método baseia-se na Indução Eletromagnética e tem como objetivo mapear a distribuição de resistividade elétrica das rochas e estruturas abaixo da superfície terrestre, utilizando parte das flutuações temporais naturais do campo geomagnético. Os sinais MT são originados primariamente por tempestades elétricas globais na baixa atmosfera e por interações entre o vento solar e a magnetosfera terrestre. De acordo com o princípio da Indução Eletromagnética, essas flutuações induzem correntes elétricas no interior terrestre cuja distribuição e magnitude, dependem da estrutura elétrica da subsuperfície. A resistividade elétrica é determinada a partir da Equação 1 e relaciona as componentes ortogonais dos campos elétrico e magnético, observados na superfície,

$$\rho = \frac{1}{\omega \mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2$$

(Eq.1)

sendo  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , o período em segundos.

A profundidade de investigação do método (*skin depth*) depende do período das oscilações do campo e da condutividade do meio e é aproximado pela Equação 2:

$$\delta(T) \approx 500 \sqrt{T \cdot \rho_a}$$

(Eq.2)

onde  $\rho_a$  é a resistividade aparente, ou a média da resistividade equivalente a um semi-espaco uniforme. Os sinais MT podem penetrar desde as camadas superficiais da Terra (períodos abaixo de 1000s) até o manto superior (períodos acima de 1000s). Como sugere a Equação 2, quanto maior for o período da oscilação do campo, maior será a profundidade a ser investigada. Em regiões bastante condutivas o sinal é atenuado mais

rapidamente, diminuindo assim, a profundidade de investigação. Devido à diferença de fase de penetração dos campos eletromagnéticos no interior terrestre, a profundidade de investigação torna-se complexa e é relacionada pelas chamadas “funções de transferência magnética”, que relacionam os campos verticais e os horizontais. Essas funções são representadas por vetores de indução, cuja amplitude e direção dependem dos contrastes laterais de resistividade elétrica. Desde que o campo magnético vertical seja gerado por esses gradientes laterais, os vetores de indução podem ser utilizados para inferirem sobre a presença dessas variações de condutividade. De acordo com o critério de *Parkinson*, adotado pela comunidade MT, os vetores apontam diretamente para concentrações anômalas de correntes elétricas no interior da Terra (*Parkinson*, 1959). As componentes ortogonais medidas dos campos elétrico e magnético horizontais são relacionadas pelo tensor de impedância complexo,  $\bar{Z}$ , sendo composto por parte real e imaginária:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}}_{\bar{Z}} \begin{pmatrix} B_x \\ \mu_0 B_y \\ \mu_0 B_y \end{pmatrix} \quad (\text{Eq.3})$$

### Modos TM e TE

As respostas MT podem ser obtidas em dois modos de polarização – modos **TM** e **TE**. No modo **TE** ( $E_x, B_y, B_z$ ) o campo elétrico é paralelo ao *strike* geoeletrico, enquanto que no **TM** ( $B_x, E_y, E_z$ ), o campo elétrico é perpendicular à direção do *strike*. Para situações 1D, os modos são equivalentes. Em casos 2D, os campos eletromagnéticos podem ser rotacionados nos diferentes modos, obtendo respostas associadas à direção de propagação da onda utilizada. Em geral, o TE é mais afetado por estruturas condutoras 3D, enquanto que o TM é mais sensível à situações de *static shift*. De maneira geral, para objetivos de inversão 2D, as curvas no modo TM são mais indicadas para detalhar estruturas próximas da superfície, regiões resistivas da litosfera e falhas profundas preenchidas com materiais condutores, enquanto que as curvas no modo TE, auxiliam na detecção de zonas condutoras em camadas profundas da litosfera e astenosfera terrestre (*Berdichevsky et al*, 1998). Inversões 2D contendo os dois modos podem ser efetuadas, abrangendo informações a respeito de ambas direções de propagação das ondas eletromagnéticas.

### Aquisição e processamento dos dados MT

Os dados foram obtidos com equipamentos MT banda larga (GMS06, Metronix), consistindo de cinco componentes de medidas, quatro horizontais ( $E_x, E_y, B_x, B_y$ ) e uma vertical ( $B_z$ ), operando em intervalos entre 0.0008 e 1024s.

Para o processamento dos dados foi utilizado o código robusto de *Egbert* (1997). O pré-processamento foi efetuado com a utilização da Transformada de Fourier

(FFT) para a conversão das séries temporais (TS) para o domínio da frequência. Nesta etapa, cada banda é processada independentemente, com as TS sendo subdivididas em janelas de 16384 pontos para a banda A, 08192 para a B, 01024 para a C e 00128 para a banda D. Os intervalos de medidas para cada banda são: A( $10^{-4}$  a  $10^{-2}$  segundos); B( $10^{-2}$  a  $10^{-1}$  segundos); C( $10^{-1}$  a  $10^{-20}$  segundos); D( $10^{-20}$  a  $1000$  segundos).

Após a integração das bandas para cada sondagem foi utilizado o software RHOPPLUS (Parker & Booker, 1996), que verifica se os valores medidos de resistividade aparente e fase são auto-consistentes e plota as curvas interpoladas e os erros de cada medida. Em seguida foram confeccionados os mapas de pseudo-seção, com suporte do software GMT. As pseudo-seções apresentadas neste artigo foram geradas com as bandas B, C e D, uma vez que os dados da banda A apresentam muitos ruídos.

## Resultados

A Figura 2 mostra um exemplo de curva MT de uma estação central do Perfil B, em que observa-se que a partir dos 10 s, aproximadamente, a fase ultrapassa os  $90^\circ$ , revelando a tridimensionalidade dos dados nessas regiões. Para melhor visualização dessas regiões, foram efetuadas pseudo-seções de fase para o perfil inteiro.

A Figura 3 mostra o resultado das pseudo-seções de fase para ambos os modos de propagação da onda (TE e TM). É possível verificar as principais feições dos dados a partir da análise da variação de fase entre as ondas dos campos elétricos e magnéticos para os modos TE e TM. Altos valores de fase (entre  $70^\circ$ - $90^\circ$ ) indicam que os dados estão sendo afetados por estruturas condutoras ou corpos condutores 3D, de menor escala, alojados em *background* mais resistivo. Dessa maneira, pode-se assumir que as cores quentes na escala de fase, em log, da Figura 3 estão relacionados às estruturas de alta condutividade.

De maneira geral, ambos os modos mostram feições similares com a presença de estruturas mais condutoras (fase entre  $60^\circ$  e  $90^\circ$ ) em um meio de resistividade mais elevada (fase entre  $0^\circ$  e  $30^\circ$ ) nos diferentes blocos litológicos, sendo que em ambos modos, TE e TM, um forte condutor 3D é identificado na região do Bloco Serrinha.

## Conclusões

De acordo com os dados obtidos nesta campanha geofísica pôde-se observar a ocorrência de situações tridimensionais na maior parte das sondagens MT, indicando a necessidade de inversões 3D para resolver os problemas magnetotelúricos desta região do cráton do São Francisco.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, pela concessão de bolsa de doutorado e aos técnicos de campo e funcionários do INPE, responsáveis pelas coletadas dos dados geofísicos.

## Referências

BARBOSA J.S.F. & SABATÉ, P. 2004. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. *Precambrian Res.*, 133:1-27.

BERDICHEVSKY, M.N.; DMITRIEV, V.I.; POZDNJAKOVA, E.E., 1997. On two-dimensional interpretation of magnetotelluric soundings. *Geophys.J.Int* v.133, p-585-606.

FURLAN, M., VITORELLO, I., OLIVEIRA E.P., DONATTI FILHO, J.P., PÁDUA, M.B., 2010. Identificação de condições litosféricas favoráveis à ocorrência de zonas mineralizadas através de estudos de indução eletromagnética, nordeste do Cráton do São Francisco. IV Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral – SIMEXMIN, Ouro Preto (MG), Maio 2010.

FURLAN, M., VITORELLO, I., OLIVEIRA, E.P., PÁDUA, M.B., SANTOS, A.C., 2010. Imaging geoelectrical structure of the lithosphere in NE São Francisco Craton: Preliminary Analysis. *Eos Transactions AGU*, 91(26), Meeting of the Americas Supplement, Foz do Iguaçu, Abstract GP41C-06.

FURLAN, M., VITORELLO, I., OLIVEIRA E.P., PÁDUA, M.B., 2010. Identificação de estruturas geoeletricas da litosfera do NE do Cráton do São Francisco a partir do método magnetotelúrico: análises preliminares. 45 Congresso Brasileiro de Geologia, 2010, Belém. Anais... Belém, SBG, 2010, Resumo PAP003733, CDROM.

JONES, A. G., 1983, On the equivalence of the Niblett and Bostick transformations in the magnetotelluric method. *J. Geophys.*, 53, 72-73.

OLIVEIRA, E.P., CARVALHO, J.M., McNAUGHTON, N.J., 2004. Evolução do Segmento Norte do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá: Cronologia de Acreção de Arcos, Colisão Continental e Escape de Terrenos. *Revista do Instituto de Geociências da USP*, v.4, n.1, p.41-53.

OLIVEIRA, E.P.; McNAUGHTON, N.J.; ARMSTRONG, R., 2010. Mesoarquean to palaeoproterozoic growth of the northern segment of the Itabuna-Salvador-Curaçá orógeno, São Francisco cráton, Brazil. *The geological society of London*, p.263-286.

PARKER, R. L.; BOOKER, J. R., 1996. Optimal One-dimensional Inversion and Bounding of Magnetotelluric

Apparent Resistivity and Phase Measurements. Physics of the Earth and Planetary Interiors, v. 98, p. 269–282.

PARKINSON, W., 1959. Directions of rapid geomagnetic Fluctuations. Geophys. J. R.Astr. Soc. 2 (1), 1–14.

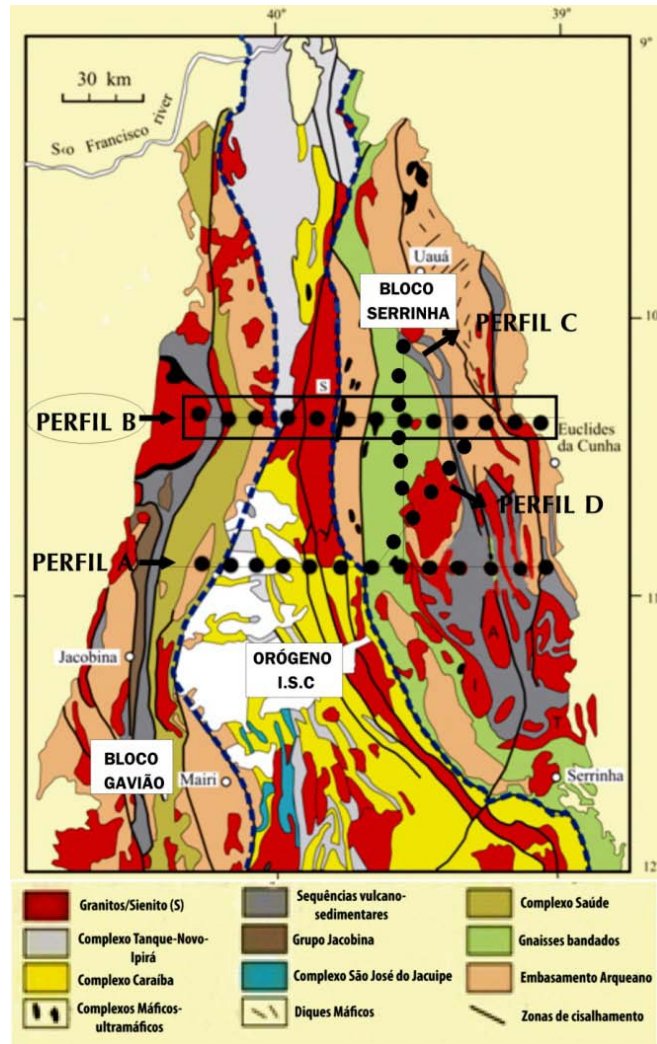


Figure 1- Mapa geológico e localização das estações MT. Os resultados apresentados neste trabalho são referentes ao Perfil B.

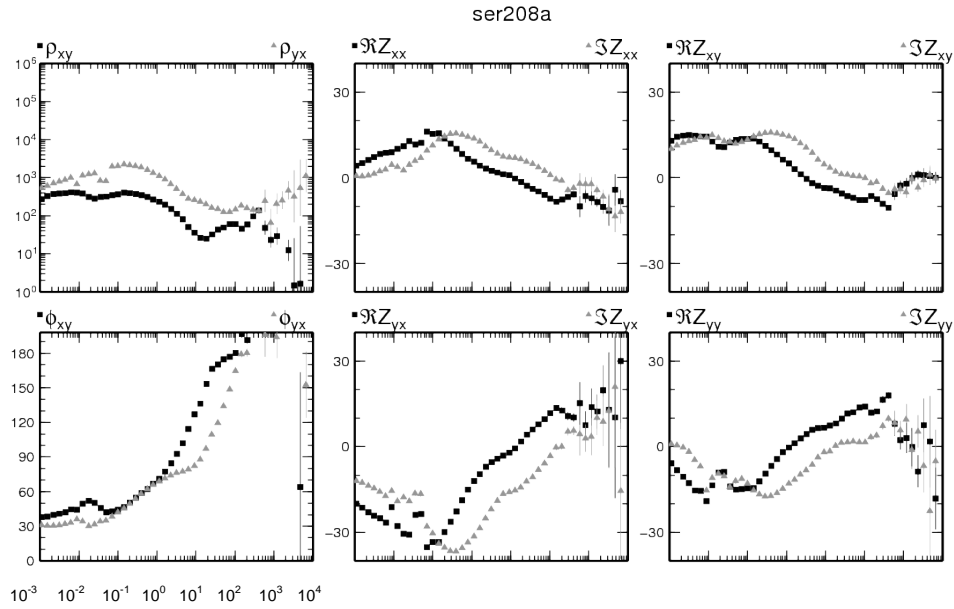


Figure 2- Curvas MT e funções de transferência de uma estação central do Perfil B

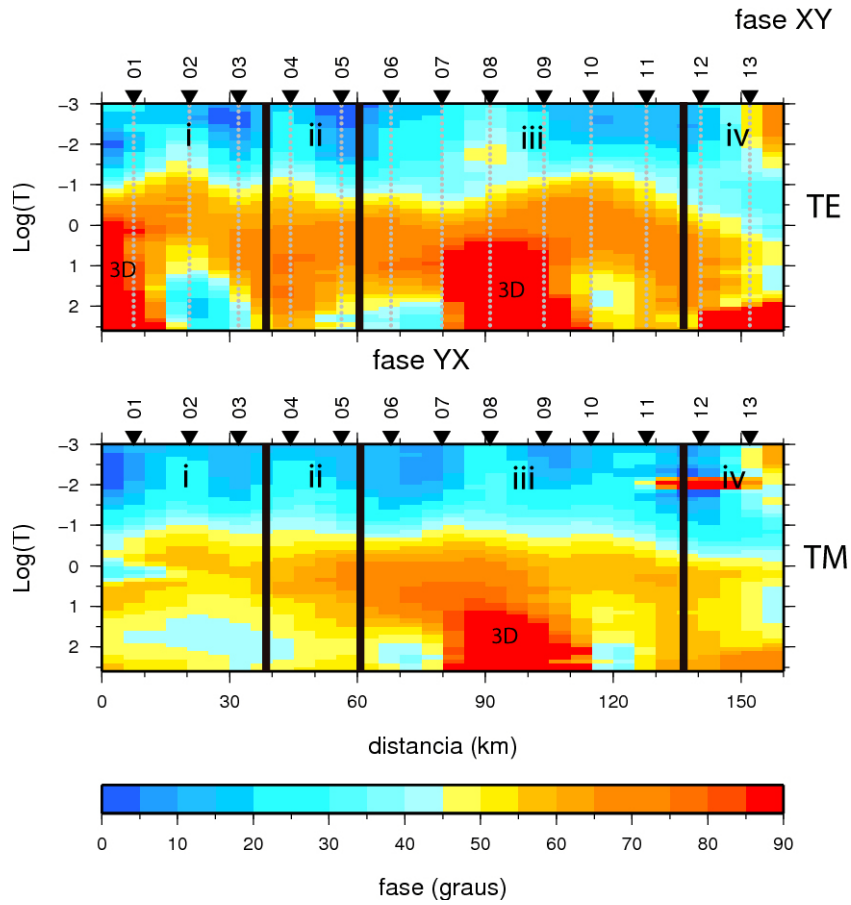


Figure 3- Pseudo-seções de fase do Perfil B em ambos os modos de propagação - TE e TM – sendo i)Bloco Gavião, ii)OISC, iii)Bloco Serrinha e iv)Bacia do Tucano.