

## Imageamento da estrutura geoeétrica da litosfera no SW da Província Borborema: Análise Preliminar.

Andrea Cristina Lima Santos, IG/UnB  
Marcelo Banik de Pádua, DGE/INPE  
Ícaro Vitorello, DGE/INPE  
Augusto Cesar Bittencourt Pires, IG/UnB

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

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

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

In the present work we show the preliminary results from magnetotelluric (MT) data processing and the preliminary analysis of a linear profile deployed perpendicularly to the tectonic structures along the states of Sergipe, Alagoas and Pernambuco, Brazil. To obtain an uniform distribution of the electrical conductivity of the crust and upper mantle in the SW portion of the Province Borborema, MT data were collected at 12 stations along a 200 km profile in the NW-SE direction. The data were processed using robust techniques, which generated MT transfer functions. For the preliminary qualitative analysis of these responses, pseudo-sections were constructed with the interpolation of the phase data into the two orthogonal directions of measurements (XY and YX). Preliminary analysis suggests that the lithosphere under the Pernambuco Alagoas (SE portion of the profile) geological terrain and the Alto Motoxó terrain (NW portion) are geoelectrically different within the middle and lower crust with a well marked discontinuity in the region of the Jatobá sedimentary basin and the Pernambuco lineament.

### Introdução

A província estrutural de Borborema é uma entidade tectônica que teve sua configuração atual definida durante o Ciclo Brasileiro (Almeida et al., 1981). Tal ciclo foi composto por uma série de eventos tectono-orogênicos, desencadeados no final do Proterozóico Superior, resultando na formação de unidades litoestruturais de rochas magmáticas consolidadas na parte superior da crosta. Ao longo dos anos, diversos autores vêm contribuindo para um melhor reconhecimento do arcabouço geológico e estrutural da província, sobretudo com base em dados geoquímicos e geocronológicos. No entanto, são escassas as informações geofísicas disponíveis sobre suas estruturas profundas. O Magnetotelúrico (MT) é um método geofísico utilizado para determinar um modelo geoeétrico da subsuperfície terrestre dentro de um intervalo de frequências que variam de 0,0001 a 1000 Hz (Hertz),

para a aquisição de MT banda larga. Nesta metodologia, utilizaram - se de medidas simultâneas das variações dos sinais do campo elétrico (**E**) e do campo magnético (**H**) naturais, na superfície da terra.

O escopo deste trabalho consistiu no processamento e análise preliminar de dados magnetotelúricos em um perfil linear que corta, transversalmente, parte dos estados de Sergipe, Alagoas e Pernambuco (Figura 1). Com o objetivo de obter um modelo da distribuição de condutividade elétrica da crosta e manto superior na porção SW da Província Borborema, foram coletados dados em 12 estações ao longo de um perfil com direção SE-NW, com extensão aproximada de 200 km. Os dados foram processados utilizando técnicas robustas, gerando-se respostas das funções de transferência dos sinais MT.

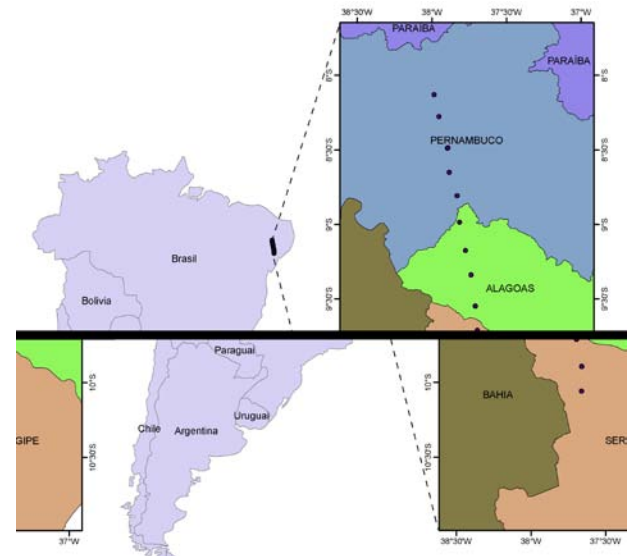


Fig.1 – Mapa de localização da área de estudo no NE do Brasil.

Para a análise qualitativa dessas respostas foram construídas pseudo-seções a partir da interpolação das fases nas duas direções ortogonais de medidas (XY e YX). A análise preliminar sugere que o Terreno Pernambuco Alagoas (porção SE do perfil) e o Terreno Alto Motoxó são geoelectricamente distintos na crosta média e inferior com uma descontinuidade bem marcada na região da Bacia Sedimentar do Jatobá.

## Contexto geológico

A complexidade tectônica do Nordeste, superimposta pela ruptura continental que separou América do Sul e África e levou à formação do Oceano Atlântico sul, tem sido motivo de estudo ao longo dos anos na tentativa de compreender a estruturação regional e o significado da compartimentação regional em termos de origem e evolução da crosta continental. Caracterizada inicialmente por Almeida et al. (1977, 1981), a Província Borborema (PB) foi definida como um complexo mosaico de blocos crustais, amalgamados, situado no Nordeste brasileiro, em consequência de processos geológicos que tiveram sua finalização no ciclo Brasileiro/Panafricano (700 a 450 Ma) como o último evento orogênico na região. Neste domínio, são característicos o volumoso plutonismo granitóide e as importantes zonas de cisalhamento de idade neoproterozóica/brasileira. Numa etapa pioneira, vários estudos foram relevantes para o conhecimento dessa província estrutural (Brito Neves, 1975; Almeida et al., 1976). Atualmente diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos para um melhor reconhecimento do arcabouço geológico e estrutural da província, sobretudo com base em dados geoquímicos e geocronológicos (Jardim de Sá, 1994; Brito Neves et al., 2000, 2003; Van Schmus et al., 2008). Esses autores subdividiram a PB em vários segmentos englobando faixas dobradas e faixas supracrustais e maciços medianos.

A Província Borborema se limita a oeste pela Bacia do Parnaíba e a sul pelo Cráton do São Francisco. As estruturas da província se estendem além de seus limites formais, encobertas a oeste pelos depósitos fanerozóicos da Bacia do Parnaíba e a norte e leste pelas bacias meso-cenozóicas costeiras e da margem continental. Do ponto de vista tectonoestratigráfico, a Província abrange 3 grandes domínios, denominados de Setentrional, Central e Meridional (Van Schmus et al., 1995), os quais correspondem a uma colagem de domínios litotectônicos menores (Jardim de Sá, 1994).

Na região setentrional da província observam-se os domínios Médio Coreaú, Ceará Central, Orós-Jaguaribe e Faixa Seridó, separados uns dos outros por importantes zonas de cisalhamento. A região central, ou Domínio da Zona Transversal, é delimitada pelos lineamentos Patos e Pernambuco. Contém vários segmentos internos de direção NE-SW (Brito Neves et al., 1995), deformados e rotacionados no sentido horário, em consequência do cisalhamento destro. Do litoral para o interior, são discriminados os terrenos Rio Capibaribe, constituído por associações supracrustais neoproterozóicas e mais antigas (Santos et al., 2004), intrudidas por granitos brasileiros; Alto Moxotó, com predominância de embasamento paleoproterozóico re-trabalhado e poucas intrusões brasileiras (Brito Neves et al., 2000). A zona transversal mostra um complexo arranjo de terrenos paleoproterozóicos, eventualmente com núcleos arqueanos, mesoproterozóicos e neoproterozóicos. O domínio meridional é constituído pelo Maciço Pernambuco-Alagoas e as faixas Sergipana e Riacho do Pontal (Brito Neves et al., 1984). Buscando aperfeiçoar o modelo de evolução geotectônica da PB proposto por Almeida et al. (1976),

Brito Neves (1975) utilizou a designação de Faixas de Dobramento Nordeste e a subdividiram em domínios estruturais. Dados de geocronologia (K-Ar e Rb-Sr) disponíveis na época levou Brito Neves (1975) a considerar que o evento Brasileiro/Panafricano estaria superposto a ciclos orogênicos mais antigos em alguns setores da PB. Acreditando em uma evolução orogênica bem mais complexa, Jardim de Sá (1994) discutiu a ocorrência, na região, de faixas supracrustais monocíclicas ou policíclicas. Os trabalhos de Santos et al. (1995) difundiram a análise de terreno propondo um modelo evolutivo para a porção sul da PB, envolvendo mecanismos de rifteamento, acreção, colisão, amalgamação e dispersão de terrenos.

O perfil MT está localizado na parte sul do Domínio Transversal e Norte do Domínio Meridional. A área de estudo corta perpendicularmente o Terreno Pernambuco-Alagoas, a Bacia Farenzóica do Jatobá, e parte do Terreno Alto Moxotó (Figura 2).

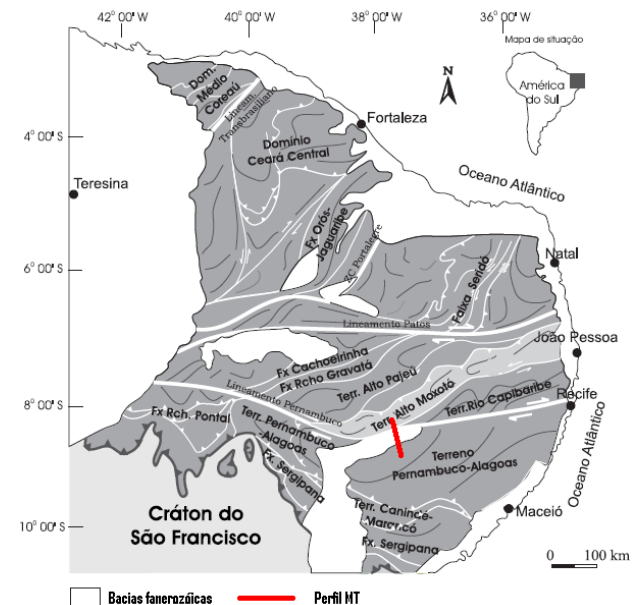


Figura 2. Mapa de Domínios Tectônicos para a província Borborema, com destaque para o perfil analisado. Modificado de Santos et al. (2004).

O Terreno Alto Moxotó é constituído por fração do embasamento paleoproterozóico, com núcleos e muitas evidências de protólitos arqueanos (Brito Neves et al., 2001). A bacia de Jatobá representa a porção mais setentrional do rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá, que constitui um ramo abortado do rifteamento sul-atlântico, estabelecido durante o Eocretáceo. Na bacia de Jatobá, como nas bacias do Recôncavo e Tucano, o Jurássico superior/Cretáceo inferior abrange sedimentos essencialmente continentais, depositados durante as fases pré-, sin- e pós-rifte. O Terreno Pernambuco Alagoas constitui um segmento intracrustal situado ao sul do Lineamento Pernambuco, formado principalmente por ortognaisses e migmatitos do Complexo Belém do São Francisco incluindo supracrustais do Complexo Cabrobó (Santos, 1995).

### Princípios básicos do Método MT

O método magnetotelúrico é uma técnica utilizada para determinar um modelo geoeletrico da subsuperfície terrestre dentro de um intervalo de frequência que varia de 0,0001 a 1000 Hz (Hertz). Nesta metodologia, utilizam-se de medidas simultâneas, das variações dos sinais do campo elétrico (E) e do campo magnético (H) naturais, na superfície da terra (Vozoff, 1991; Simpson e Bahr, 2005). Tais variações são causadas por correntes elétricas presentes na ionosfera e magnetosfera terrestre, onde são geradas ondas eletromagnéticas que se propagam para a superfície. A propagação dessas ondas em um meio condutor induz um campo elétrico, o qual vai conduzir uma corrente elétrica nesse meio. À medida que esse campo eletromagnético se difunde para o interior da terra, o mesmo atravessa regiões que apresentam mudanças de condutividade, as quais se correlacionam com variações litológicas, mineralógicas, conteúdo de fluido, propriedades dielétricas, permeabilidade, porosidade e salinidade. Quando o sinal eletromagnético encontra limites com diferentes condutividades, campos secundários são gerados e parte deles se propaga de volta para superfície trazendo informações de mudanças relativas de condutividade em subsuperfície. Esses sinais são obtidos no domínio do tempo e são processados no domínio da frequência com a finalidade de se chegar às impedâncias. Estas, por sua vez, são interpretadas em termos da resistividade elétrica, como função da posição e da profundidade através de modelos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. A definição do tensor de impedância eletromagnética (**Z**) se dá através da relação entre as componentes horizontais complexas dos campos elétrico (**E**) e magnético (**H**) em direções mutuamente ortogonais (Eq. 1).

$$\mathbf{E} = \mathbf{ZH}; \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.1})$$

Para calcular resistividades aparentes ( $\rho_a$ ) e fases ( $\varphi$ ), se utiliza dos elementos do tensor de impedâncias através das seguintes equações:

$$\rho = \frac{|Z|^2}{\mu_0 \omega} \quad (\text{Eq.2})$$

e

$$\varphi = \text{Arg}(Z) \quad (\text{Eq.3})$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $\omega$  é a frequência angular.

A penetração do sinal no interior terrestre depende do seu período de oscilação e da condutividade do meio. A profundidade de penetração dos sinais eletromagnéticos é expressa através da profundidade pelicular (*skin depth*), calculada a partir da profundidade na qual o sinal

natural é reduzido em 1/e (aproximadamente 37%) de seu valor na superfície (Eq. 4). Embora a penetração do sinal eletromagnético varie, diretamente, em função da raiz quadrada do período, ela depende, inversamente, também da distribuição da condutividade elétrica dos materiais do meio. Assim, as ondas eletromagnéticas penetram maiores profundidades para períodos mais longos e/ou rochas mais resistivas.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \approx 500 \sqrt{\rho T} \quad (\text{Eq.4})$$

### Metodologia

#### Aquisição dos dados MT

Dados de banda larga foram coletados em 12 sondagens num perfil de aproximadamente 200 km. As sondagens foram realizadas no ano de 2007 ao longo de um perfil linear que corta perpendicularmente, parte dos estados de Sergipe, Alagoas e Pernambuco (Figura 3). Os dados foram obtidos através do equipamento GMS06 (Metronix GmbH), que utiliza eletrodos não polarizáveis a base de cloreto de chumbo e sensores magnéticos do tipo bobina de indução para as medidas das componentes eletromagnéticas. O instrumento adquiriu dados numa faixa espectral entre 0,0008 s – 1024 s. Para esta faixa espectral, os valores de resistividade observados na região permitiram atingir profundidades entre algumas dezenas de metros até dezenas de quilômetros. A duração típica de cada sondagem foi de 24 h.

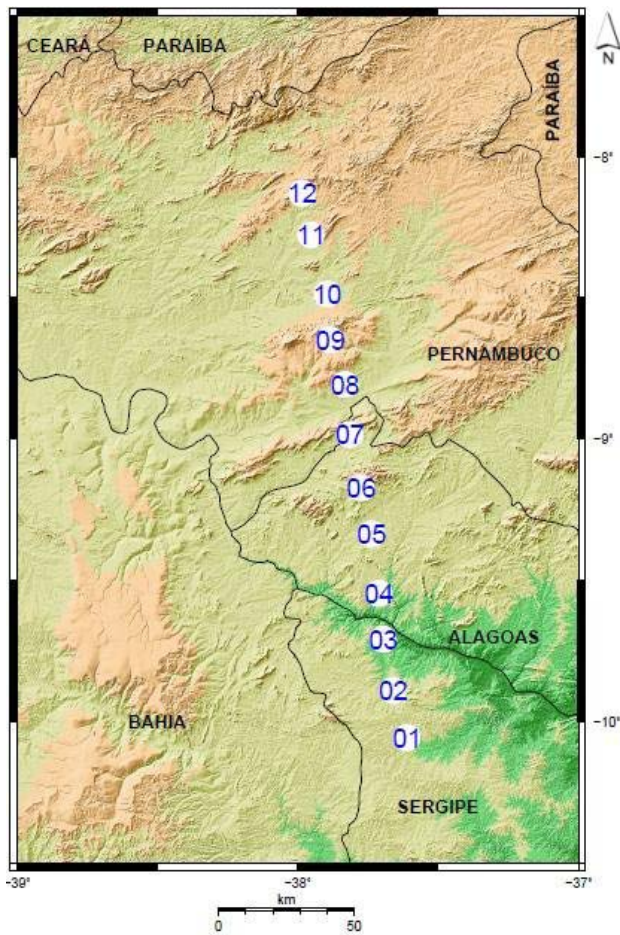


Figura 3. Localização das sondagens MT. Imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), com resolução de 90 metros. Modificado de EMBRAPA (2009).

O arranjo para medidas em campo seguiu o padrão para a aquisição de cinco componentes ortogonais do campo eletromagnético. Cada componente do campo elétrico ( $E_x$  e  $E_y$ ) é calculada de forma indireta, medindo-se a diferença de potencial entre pares de sensores elétricos e dividindo-se pela separação entre eles. A separação entre esses sensores, utilizada para esse estudo, foi de 150 m. O alinhamento, efetuado com o auxílio de bússolas, foi ao longo das direções norte-sul e leste-oeste geomagnéticas. Para os registros das variações das componentes do campo magnético ( $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ ), foram utilizadas bobinas de indução posicionadas ao longo das direções norte-sul, leste-oeste geomagnéticas e vertical.

### Processamento inicial dos dados MT

Os dados foram processados seguindo procedimento adotado pelo grupo de pesquisa em Geomagnetismo da Divisão de Geofísica Espacial – GEOMA/DGE/INPE (Figura 4).

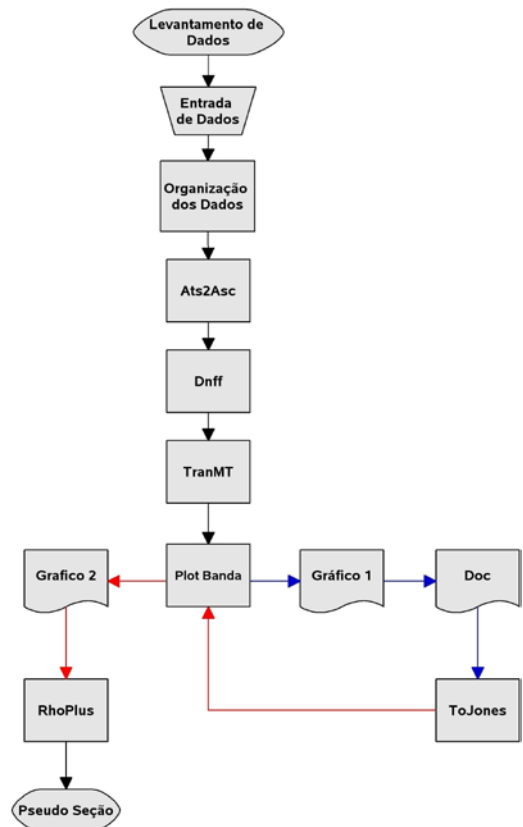


Figura 4. Fluxograma de processamento inicial de dados MT.

Depois de organizados, os dados, que saem do equipamento em formato binário, foram transformados a partir de um programa chamado Ats2Asc para o formato de entrada no programa estatístico robusto de Gary Egbert (Egbert, 1997). Dentro do programa Egbert foram rodadas duas subrotinas: Dnff e TranMT. O processamento MT foi realizado no domínio da frequência. A conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência foi realizada através da Transformada de Fourier. A subrotina Dnff foi utilizada para a análise espectral, obtendo-se os coeficientes de Fourier (FFT) das séries temporais registradas. Assim, foram preparados os dados para o próximo passo, que consistiu no processo de estatística robusta. A subrotina TranMT, aplicada em seguida, foi utilizada para fazer a estatística robusta com o intuito de remover os *outliers*. O resultado final dessa análise é a estimativa do tensor de impedância. Posteriormente foram configurados os resultados de cada banda de frequência. Os melhores resultados foram armazenados num documento para serem usados na integração das bandas. Em seguida, utilizou-se do programa ToJones para converter os dados do formato Egbert para o formato Jones. Essa transformação é feita, porque na segunda parte do processamento será necessário utilizar desse novo formato. Utilizou-se, ainda, do programa ToJones para a composição das séries completas das bandas de frequências. O programa RhoPlus foi utilizado para se fazer a transformada de Hilbert (Parker e Booker, 1996). A ideia foi a de verificar se os dados eram consistentes com um modelo 1D ou 2D, antes de se proceder com a modelagem. É possível obter desse programa curvas



interpoladas de resistividade e fase que se ajustam a modelos 1D e/ou 2D. Por fim, os dados foram transformados em mapas de pseudo-seções, os quais consistem em uma primeira visualização dos dados visando a interpretação preliminar.

**Resultados preliminares**

A Figura 5 apresenta as pseudo-seções obtidas a partir da interpolação das fases nas direções ortogonais (xy e yx), resultado preliminar para o perfil estudado. Por não serem significativamente afetadas pelo desnível estático (*static shift*), as pseudo seções da fase permitem uma visão qualitativa inicial das principais estruturas geolétricas da área analisada (Larsen, 1977; Jones, 1988).

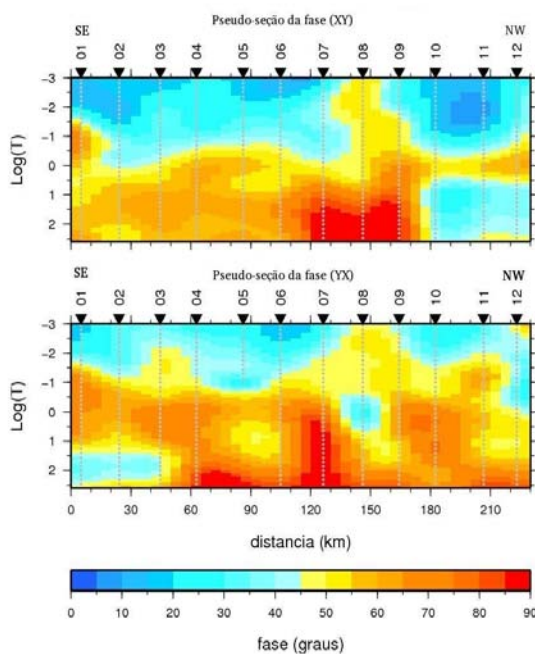


Figura 5. Pseudo seção para as componentes xy e yx, do perfil MT.

As pseudo seções indicam, em geral, uma crosta superior resistiva com uma descontinuidade condutora na região da Bacia Sedimentar do Jatobá. Na pseudo seção da componente xy, nota-se mais claramente a presença de um condutor na crosta média ao longo de todo o perfil. Na crosta inferior é possível observar uma estrutura geolétrica distinta na porção NW, mais resistiva que a estrutura observada a SE, separada pela descontinuidade da Bacia Jatobá.

A pseudo seção da componente yx apresenta variações na região da crosta média e inferior, provavelmente relacionada a um condutor forte fora do perfil (Bacia do Recôncavo Tucano?).

A sondagem 08 (Figura 6), aproximadamente no centro da Bacia, mostra em períodos mais curtos uma estrutura bastante uniforme possivelmente relacionada a sedimentos da bacia (estrutura 1D/2D). Já para períodos

mais longos a uma heterogeneidade forte com a fase passando de 90°, indicando uma estrutura 3D possivelmente associado a um embasamento bastante estruturado (estruturas de *graben* e *horst*?).

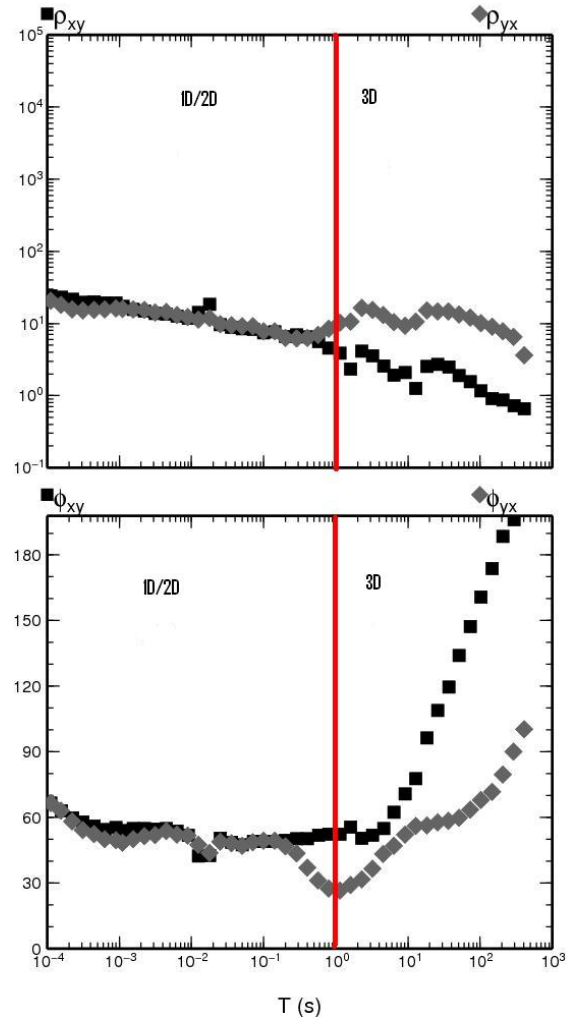


Figura 6. Curva de resistividade ( $\rho$ ) e fase ( $\Phi$ ) para a sondagem 08 (aproximadamente no centro da bacia sedimentar do Jatobá). A linha vertical vermelha assinala a transição entre as condições 1D/2D para a porção mais rasa, e 3D para maiores profundidades de sondagem.

A análise preliminar sugere que o Terreno Pernambuco Alagoas (porção SE) e o Terreno Alto Motoxó são geoelectricamente distintos na crosta média e inferior com uma separação bem marcada na região da Bacia do Jatobá.

Após essa análise preliminar qualitativa dos dados, pretende-se em etapas posteriores realizar uma inversão 2D e modelagem direto 3D para definir melhor as estruturas geolétricas identificadas nesse trabalho, corroborando ao conhecimento geotectônico local

**Agradecimentos**

Os autores agradecem a Universidade de Brasília e ao CNPq, que possibilitaram os meios acadêmicos e econômicos; e às equipes de campo e processamento de dados do grupo de Geomagnetismo do INPE.

## Referências

- Almeida, F. F. M.** 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7, 349-364.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y. and Brito Neves, B.B.** 1976. The Upper Precambrian of South América. *Boletim IG/Universidade de São Paulo*, 7, 45-80.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.** 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: simpósio de Geologia do Nordeste, 8, 363-391.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B. and Fuck, R.** 1981. Brazilian Structural provinces: na intruducion. *Earth Sci. Ver.*, 17, 1-29.
- Brito Neves, B.B.** 1975. Regionalização Geotectônica do Precambriano Nordestino. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 198p.
- Brito Neves, B. B., Fuck, R. A., Cordani, U. G. and Thomaz Filho, A.** 1984. Influence of Basement Structures in the Evolution of the Major Sedimentary Basins of Brazil. *Journal of Geodynamics*, 1, 495-510.
- Brito Neves, B. B., Van Schmus, W. R., Santos, E. J., Campos Neto. C. and KOZUCH, M.** 1995. O evento Cariris Velhos na Província Borborema : Integração de Dados, Implicações e Perspectivas. *Revista Brasileira de Geociências*, 25, 279-296.
- Brito Neves, B. B., Santos, E. J., Van Schmus, W. R.** 2000 - Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. In Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31 International Geological Congress, 151-182.
- Brito Neves, B. B., Van Schmus, W. R., Santos, E. J.** 2001. O Sistema Pajeú-Paraíba e o Maciço São José do Campestre no Leste da Borborema. *Revista Brasileira de Geociências*, 31, 173-184.
- Brito Neves, B. B., Passarelli, C. R., Basei, M. A. S., Santos, E. J.** 2003. Idades U-Pb em Zircão de alguns Granitos Clássicos da Província Borborema. *Geologia USP, Série Científica*, 3, 25-38.
- Egbert, G.D., 1997,** Robust Multiple Station Magnetotelluric Data Processing. *Geophys. J. Int.*, 130, 475- 496.
- Embrapa.** 2009. O Brasil em Relevo. Shuttle Radar Topography Mission – SRTM. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download>.
- Jardim de Sá, E. F.** 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE Brasil) e o seu Significado Geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana, Brasília, Universidade de Brasília, unpublished Ph.D. Thesis, 803p.
- Jones, A.G.** 1988. Static Shift of Magnetotelluric Data and its Removal in a Sedimentary Basin Environment. *Geophysics*, 53, 967-978.
- Larsen, J.C.** 1977. Removal of local surface Conductivity Effects From Low Frequency Mantle Response Curves. *Acta Geodaet., Geophys. Et Montanist. Acad. Sci. Hungary*, 12, 183-186.
- Paker, R. L.,and Booker, J. R.** 1996. Optimal One-dimensional inversion and Bounding of magnetotelluric apparent resistivity and phase measurements. *Physics of the earth and planetary interiors*, 98, 269-282.
- Santos, E.J.** 1995. O Complexo granítico Lagoa das Pedras: Acreção e Colisão na Região Floresta (Pernambuco), Província Borborema. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 219p.
- Santos, E. J., Nutman, A. P., Brito Neves, B. B.** 2004. Idades SHRIMP U-Pb do Complexo Sertânia: implicações sobre a evolução tectônica da zona transversal, Província Borborema. *Geologia USP, Série Científica*, 4, 1-12.
- Simpson, F., and Bahr, K., 2005,** Practical Magnetotellurics. Cambridge University Press, Cambridge, 270p.
- Van Schmus, W. R., Brito Neves, B. B., Hackspacher, P. C. and Barbinski, M.** 1995. U-Pb and Sm-Nd Geochronologic Studies of the Eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, 8, 267-288.
- Van Schmus, W. R., Oliveira, E.P., Silva Filho, A.F., Toteu, S.F., Penaye, J. and Guimarães, I.P.** 2008. Proterozoic links Between the Borborema Province , NE Brazil, and the Central African Fold Belt. In Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B., de Witt, M.J. *West Gondwana, Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London, Special Publications, 294, 69-99.
- Vozoff, K.** 1991. The magnetotelluric Method, in Nabighian, M.N. (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 3, 641-711.