



Caracterização da bacia de São Francisco: inversão conjunta de dados MT, sísmicos, gravimétricos e magnetométricos

Flora F. Solon, Observatório Nacional/MCTI
Sergio L. Fontes, observatório Nacional/MCTI

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th 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

An attempt is made to locate fractured crystalline basement and overlying carbonate reservoir underneath thick overburden at São Francisco basin in Brazil using a cross-gradient joint inversion methodology. This is a major problem in oil and gas exploration in this basin using seismic reflection and it is expected that the combined use of different geophysical methods will enhance the structural resemblance in the images that each one provides. For the joint inversion approach we used a two-dimensional structured-coupled joint inversion from Gallardo and Meju (2003) applying to four data sets: land seismic reflection, magnetotelluric (MT), gravity and magnetic data sets along a 100 km profile. It is necessary to determine appropriate processing parameters to better estimate the individual contribution from each geophysical data type. This justifies doing several experiments using initially two data sets, three and finally the four data sets. The evolution of the joint inversion showed that the solution is mostly controlled by the development of common features in all models. It was possible to define the compartmentalized basement in this sector of São Francisco Basin, not clear in the seismic section and it is possible to identify the units of Bambuí group, resulting in a constrained geological interpretation.

Introdução

Na exploração de bacias sedimentares, medidas de reflexão sísmica fornecem informação de alta resolução sobre as sequências sedimentares. No entanto, muitas vezes essas informações dependem de outros dados geofísicos para resolver características específicas, tais como saturação de fluidos. Um exemplo de unidades geológicas consideradas hoje um desafio são os reservatórios carbonáticos. Eles são difíceis de caracterizar uma vez que a porosidade, permeabilidade e saturação de fluidos (três propriedades básicas de um reservatório) pode variar aleatoriamente nos carbonatos e rochas clásticas. Vale ressaltar que a propriedade física de materiais subsuperficiais mais afetados por alterações no conteúdo de fluido é a resistividade elétrica. Assim,

informações importantes e, em muitos aspectos, única sobre alvos de reservatório pode ser deduzida a partir das medições da sua resistividade elétrica e da aplicação de metodologias que incorporem essa informação a outras de diferentes naturezas.

A necessidade de um estudo detalhado e caracterização da subsuperfície conduzem ao desenvolvimento de diversas estratégias capazes de combinar diversos tipos de dados geofísicos. (Auken et al., 2006; Heincke et al., 2006; Kowalsky et al., 2006; Bedrosian, 2007; Colombo e De Stefano, 2007; Alpak et al., 2008; Gallardo e Meju, 2011; Moorkamp et al., 2011). Apesar do aumento da utilização de dados não sísmicos em estudos de bacia, existem apenas algumas abordagens que objetivamente integram toda esta informação disponível na forma de inversão conjunta. Entre os poucos algoritmos de inversão conjunta que incorporam dados sísmicos de reflexão estão (Gallardo e Meju, 2004, Heincke et al., 2006, Colombo e De Stefano, 2007, Hu et al., 2009, Newman e Commer, 2010, Gallardo *et al.*, 2012).

O objetivo deste trabalho foi aplicar a metodologia de inversão conjunta proposta por Gallardo e Meju (2003). Essa abordagem adapta o algoritmo de inversão conjunta de Gallardo (2007) para utilizar dados de tempos de reflexão, MT, gravimétricos e magnetométricos. Este algoritmo baseia-se na utilização de um vínculo estrutural chamado *cross-gradient* (*produto vetorial dos gradientes de duas grandezas geofísicas*) que mede a similaridade estrutural entre modelos geofísicos distintos (Gallardo e Meju, 2003, 2004) e fornecem estimativas de densidade, magnetização, resistividade e velocidade sísmica que ressaltam estruturas comuns a todos estes métodos.

Com isso pretendeu-se verificar se esta metodologia é capaz de fornecer informações adequadas sobre as rochas do embasamento e sedimentares na bacia do São Francisco.

Acredita-se que isto constitui uma contribuição significativa para a forma de estudar as bacias sedimentares, bem como distinguir estruturas de difícil caracterização.

Área de Estudo

A bacia proterozóica de São Francisco cobre uma área de 350.000 Km², e localiza-se no interior do Brasil, sobre o Cráton do São Francisco, englobando regiões dos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Tocantins e Distrito Federal. É uma bacia intracratônica policíclica

pouco deformada na parte central e deformada em suas bordas, flanqueadas pelas faixas móveis compressivas Brasília (a oeste) e Araçuaí (a leste) (Zalan & Romeiro-Silva, 2007). A bacia é preenchida principalmente por sedimentos clásticos e carbonáticos Neoproterozóicos de rochas do Grupo Bambuí. Estes são recobertos por rochas sedimentares do Grupo Santa Fé (Carbonífero-Permiano), Areado (Valanginian a Albiano) e Uruçua-Mata da Corda (Cenomaniano ao Maastrichtiano).

Uma série de estudos geofísicos foi realizada e os dados foram individualmente interpretados a fim de caracterizar a arquitetura e compartimentação da bacia e do embasamento. Apontam-se estudos realizados a partir de perfilação de poço pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil, (Brandalise 1980) e Petrobras (1991); levantamentos aéreos gravimétricos e magnetométricos (Bosun 1973, Lesquer *et al.* 1981, Petrobras 1991); sísmica de reflexão (Petrobras 1992) e MT (Porsani e Fontes 1993, 2001, Solon *et al.* 2011).

Nas linhas sísmicas regionais, da Faixa Araçuaí, o embasamento sob a supersequência mais basal apresenta sismo-fácies típicas de rochas cristalinas. (Romeiro-Silva e Zalán, 2005). Dessa forma, supõe-se que o embasamento da bacia de São Francisco deve ser constituído por gnaisses, granitos e rochas metamórficas de alto grau, com idades superiores a 1,8 Ga (Alkmim e Martins-Neto, 2001).

Lesquer *et al.* (1981) apontam para as anomalias gravimétricas negativas ao sul da latitude 14°S. São anomalias com direção N35E rodeadas por anomalias gravimétricas positivas que evidenciam os altos estruturais do embasamento, comuns para essa região do cráton. Teixeira *et al.* (1993) refere-se a esta anomalia como um depocentro controlado por uma falha normal de direção E-W enquanto Marinho (1993) interpretou profundidades de embasamento para esta região variando de 2 a 5 km.

A área investigada neste trabalho é conhecida como Remanso do Fogo por suas antigas emanações de gás. Localiza-se na porção central da bacia e compreende depósitos pouco deformados emoldurados pelo embasamento fraturado de formações gnáissicas, graníticas e granulíticas arqueanas (Teixeira *et al.* 1993). Rochas reservatórios potenciais são encontradas entre as rocas siliciclásticas do Grupo Macaúbas - Paranoá e os carbonatos do Grupo Bambuí.

É apresentada aqui uma revisitação de um levantamento magnetotélúrico (MT) realizado na Bacia de São Francisco por Porsani & Fontes (1993, 2001) que realizaram um estudo de modelagem unidimensional (1D). As sondagens MT foram levantadas na parte central da bacia sedimentar de São Francisco, região norte do estado de Minas Gerais, totalizando 43 estações ao longo de oito perfis MT. Para este estudo utilizaram-se dados de 11 estações MT formando um perfil coincidente com a linha sísmica 0240-0060, parte de um levantamento sísmico realizado na década de 90 pela Petrobras. Os dados MT deste levantamento foram

anteriormente processados e interpretados por Porsani e Fontes (1993), Porsani (1993) e Solon *et al.*, (2011). Foram utilizados também para este estudo, dados de anomalia Bouguer e aeromagnetometria adquiridos e processados pela ANP. O perfil de anomalia Bouguer e anomalia magnética residual foram reamostrados a cada quilômetro sobre um perfil coincidente com o perfil MT e sísmico. A figura 1 mostra um mapa com a localização dos dados MT e sísmicos utilizados neste trabalho.

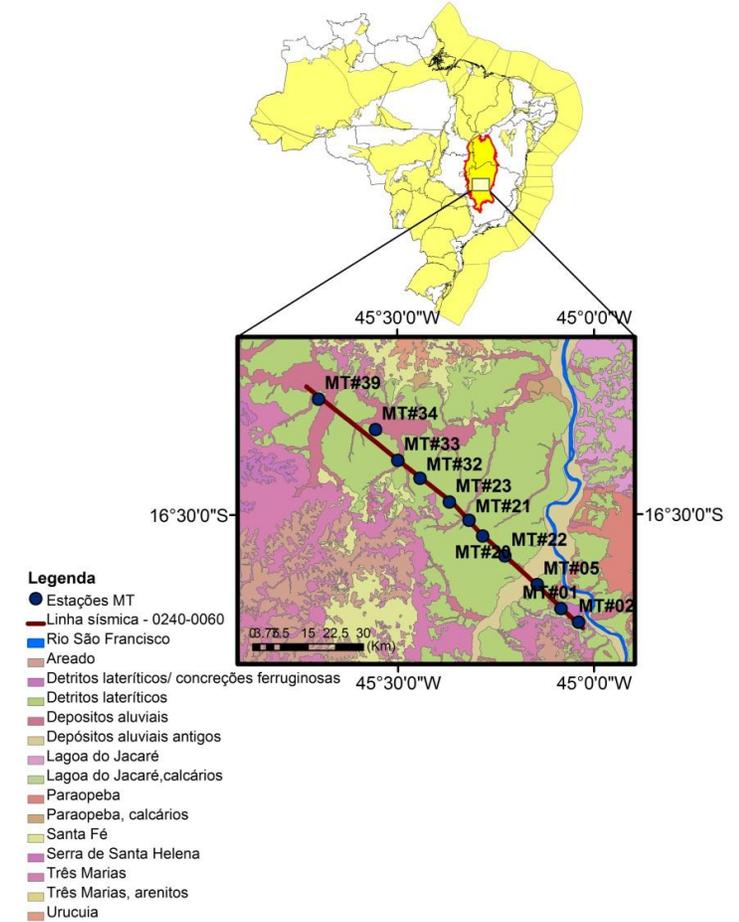


Figura 1. Mapa geológico da região estudada e localização dos dados MT e linha sísmica.

Metodologia

Seja \mathbf{d}_g um vetor N_g dimensional que contém todas as observações d_{gi} , $i = 1, \dots, N_g$ com desvio padrão σ_{gi} , da anomalia de gravidade \mathbf{d}_m é um vetor N_m dimensional que contém todas as observações d_{mi} , $i = 1, \dots, N_m$ com desvio padrão σ_{mi} , da anomalia de campo total. \mathbf{d}_s é um vetor N_s dimensional que contém todas as observações d_{si} , $i = 1, \dots, N_s$ com desvio padrão σ_{si} , de tempo de transito das ondas sísmicas refletidas. Finalmente, \mathbf{d}_r é um vetor N_r dimensional que contém todas as observações d_{ri} , $i = 1, \dots, N_r$ com desvio padrão σ_{ri} , de resistividade aparente e a fase para todas as frequências, nos modos TE e TM de todas as estações MT mostradas na figura 1.

Os 4 conjuntos de dados foram produzidos por uma distribuição de propriedade física em subsuperfície discretizada segundo a abordagem de Gallardo e Meju (2004) em células retangulares bidimensionais, em uma malha que é mais fina na região mais rasa e mais espessa em regiões profundas. A distribuição de propriedade física na subsuperfície é então caracterizada pelos vetores de parâmetros $\mathbf{m}_g, \mathbf{m}_m, \mathbf{m}_r$ e \mathbf{m}_s .

Para determinar uma distribuição de propriedade física, que explique os 4 conjuntos de dados observados (gravimétrico, magnetométrico, MT e sísmico), Gallardo e Meju (2004) propuseram um método iterativo que consiste em determinar os 4 vetores de parâmetros ($\mathbf{m}_g, \mathbf{m}_m, \mathbf{m}_r$ e \mathbf{m}_s) que minimizam a função objetiva dada por:

$$\min \left\{ \phi_L(\mathbf{m}) = \frac{1}{\beta^2} [\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}_0) - \mathbf{A}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)]^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{C}^{-1} [\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}_0) - \mathbf{A}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)] + [\mathbf{D}\mathbf{m}]^T [\mathbf{D}\mathbf{m}] + [\mathbf{m} - \mathbf{m}_R]^T \mathbf{C}_R^{-1} [\mathbf{m} - \mathbf{m}_R] \right\} \quad (1)$$

$$\text{sujeito a } \boldsymbol{\tau}(\mathbf{m}_0) + \mathbf{B}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) = \mathbf{0} \quad (1)$$

em que \mathbf{d} é um vetor de parâmetros que contém os vetores de dados observados gravimétricos, magnetométricos, MT e sísmicos, \mathbf{C}^{-1} , contém as matrizes diagonais \mathbf{C}_v^{-1} , $v = g, m, r, s$, $NvXv$, cujo j -ésimo elemento, $j = 1, \dots, Nv$ é dado pelo inverso do desvio padrão do j -ésimo dado gravimétrico, magnetométrico, MT ou sísmico. Na expressão 1, β é um fator de amortecimento. \mathbf{m}_0 contém os vetores de parâmetros gravimétricos, magnetométricos, MT e sísmicos em torno dos quais os dados foram linearizados. $\mathbf{f}(\mathbf{m}_0)$ contém os vetores de dados preditos avaliados em \mathbf{m}_0 , \mathbf{A} contém as matrizes de sensibilidade $NvXv$ dimensional, que contém as derivadas dos dados preditos gravimétricos, magnetométricos, MT e sísmicos em relação aos parâmetros avaliados em \mathbf{m}_0 . \mathbf{m} contém todos os vetores de parâmetros. O problema é regularizado usando uma versão discreta da regularização de Tikhonov de segunda ordem, matriz \mathbf{D} , contém as matrizes de suavidade \mathbf{D}_v , para cada conjunto de parâmetros. α_v é um fator que controla a suavidade de cada conjunto de parâmetros. \mathbf{m}_{Rv} é o vetor de parâmetros de referência definidos com base na informação a priori. Por fim, a equação $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{m}_0) + \mathbf{B}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) = \mathbf{0}$ é o vínculo de *cross-gradients*, linearizado em torno de \mathbf{m}_0 , sendo \mathbf{B} a matriz que contém as derivadas do vínculo de *cross-gradients* em relação aos parâmetros. Para detalhes, ver Gallardo e Meju (2004), Gallardo (2007) e Gallardo et al., (2012).

A formulação do problema direto para os diversos dados geofísicos foi feita utilizando técnicas bem estabelecidas. Para os dados sísmicos utiliza-se a abordagem de diferenças finitas progressivas de Vidale (1988), para MT

utiliza-se a abordagem de Smith e Booker (1991), para gravimetria utiliza-se a formulação analítica proposta por Banerjee e Gupta (1977) e, por fim, a resposta magnetométrica é computada pela formulação analítica proposta por Bhattacharyya (1964).

A estimativa \mathbf{m}^* para o vetor de parâmetros \mathbf{m} , que é a solução para a equação 1, é determinada utilizando multiplicadores de Lagrange (Menke, 1984; Tarantola, 1987) e é definida como:

$$\mathbf{m}^* = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n} - \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\Lambda}, \quad (2)$$

em que

$$\boldsymbol{\Lambda} = (\mathbf{B}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{B}^T)^{-1} [\mathbf{B}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{n} - \mathbf{B}\mathbf{m}_0 + \boldsymbol{\tau}(\mathbf{m}_0)], \quad (3)$$

é o vetor que contém os multiplicadores de Lagrange e \mathbf{N} e \mathbf{n} são definidos por:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A} + \mathbf{D}^T \mathbf{D} + \mathbf{C}_R^{-1}, \quad (4)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \mathbf{C}^{-1} \{\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}_0) + \mathbf{A}\mathbf{m}_0\} + \mathbf{C}_R^{-1} \mathbf{m}_R, \quad (5)$$

em que $\mathbf{C}^{-1} = \mathbf{C}^{-1/2} \mathbf{C}^{-1/2}$, sendo $\mathbf{C}^{-1/2}$ dado pela equação 1, e $\mathbf{C}_R^{-1} = \mathbf{C}_R^{-1/2} \mathbf{C}_R^{-1/2}$, sendo $\mathbf{C}_R^{-1/2}$ dada pela equação 1. O primeiro termo de \mathbf{m}^* na equação 3 corresponde à solução regularizada por mínimos quadrados sem a contribuição do vínculo *cross-gradients*, ou seja, corresponde à inversão separada dos dados. O segundo termo dessa equação corresponde à contribuição do vínculo *cross-gradients*.

Resultados e discussões

Para avaliar a contribuição individual de cada tipo de dado geofísico da bacia de São Francisco e determinar parâmetros de inversão adequados, foi realizado primeiramente um processo de inversão separada dos dados gravimétricos, magnetométricos e MT. No início de cada iteração do ciclo externo do algoritmo de inversão de Gallardo e Meju (2004), calcula-se o modelo estimado \mathbf{m} utilizando somente o primeiro termo da equação 2. Dessa forma a estimativa é obtida sem a contribuição do vínculo *cross gradients*, ou seja, corresponde à inversão separada dos dados. Para realizar a inversão separadamente, suprime-se o segundo termo da equação 2 durante todo o processo.

A inversão conjunta destes dados foi realizada em seguida utilizando os mesmos modelos iniciais utilizados na inversão separada. Para as inversões, a subsuperfície foi discretizada em células retangulares que compuseram modelos iniciais homogêneos caracterizados pelo contraste de densidade igual a 0,0 g/cm³, contraste de magnetização igual a 0,0 Amp/m, resistividade elétrica igual a 100 ohm.m e velocidade sísmica de 4000 m/s.

Os modelos obtidos a partir das inversões separadas e conjunta são mostrados na figura 2a e 2b respectivamente. Em geral, existe uma diferença

estrutural importante entre os modelos gerados a partir de inversão separada e conjunta. Os modelos gerados a partir da inversão separada mostram grandes diferenças estruturais, por exemplo, entre os modelos de densidade e resistividade. No entanto, os modelos estimados conjuntamente (figura 2b) acomodam as estruturas

dentro da zona de estruturas que representam os três modelos simultaneamente. Portanto, nota-se que os modelos de inversão conjunta utilizando o vínculo *cross-gradients* conciliam as diferenças e similaridades estruturais que existem entre os modelos de densidade, magnetização e resistividade.

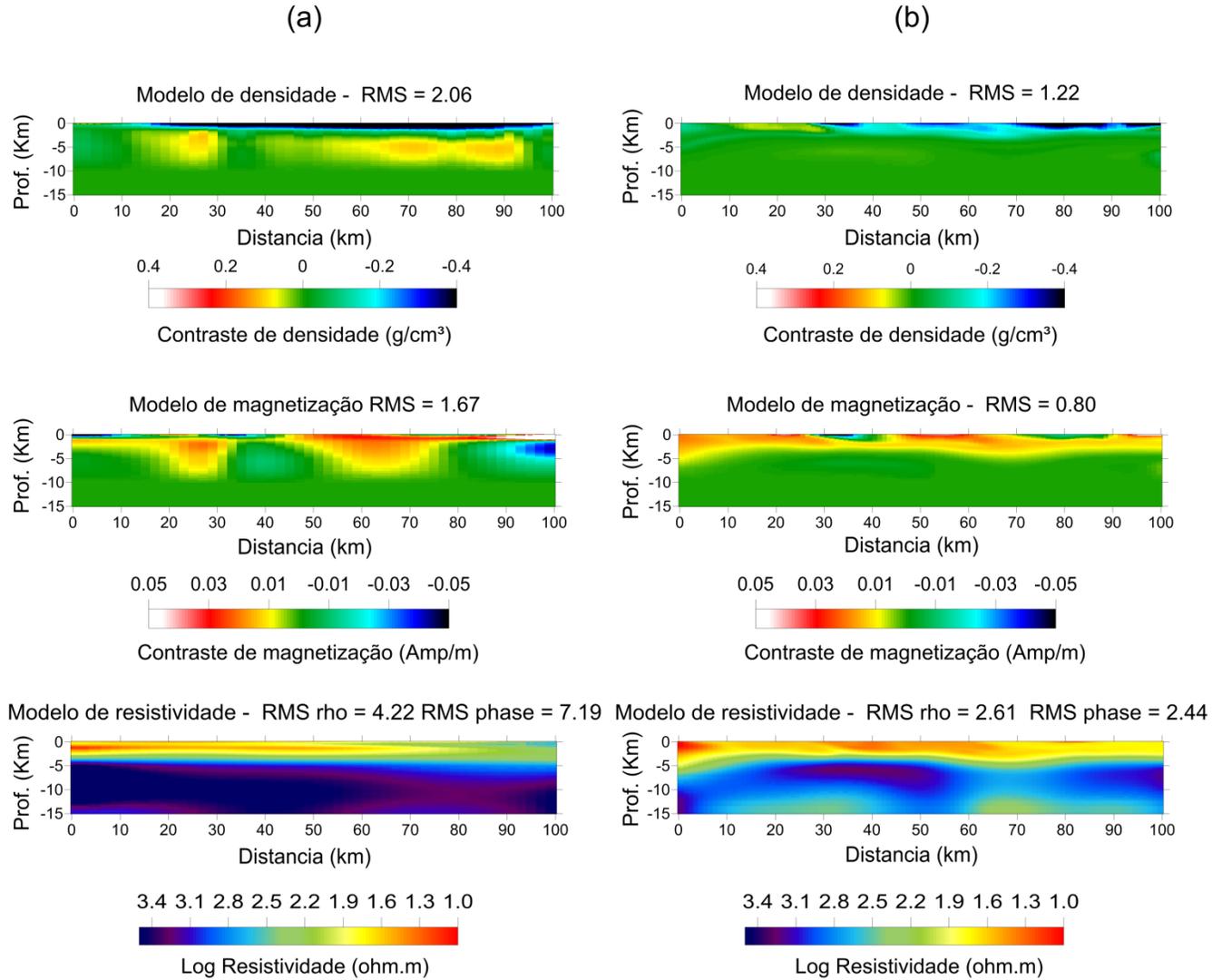


Figura 2. Comparação entre resultados obtidos através da inversão separada e conjunta de Gallardo e Meju (2004). (a) representa os modelos de densidade, magnetização e resistividade na inversão separada. (b) representa os modelos de densidade, magnetização e resistividade obtidos na inversão conjunta.

Com respeito às estimativas de densidade e magnetização obtidas através da inversão separada, observa-se na figura 2a uma concentração de estruturas na superfície e alguns artefatos em regiões mais profundas. É possível observar que há um refinamento nas estimativas de densidade e magnetização mostradas na figura 2b, onde é possível identificar com mais precisão a compartimentação do embasamento.

No caso MT, é possível notar que o modelo de resistividade gerado pela inversão separada mostra estruturas bastante aplainadas retratando um caráter bastante unidimensional. O modelo gerado pela inversão conjunta detalha melhor a compartimentação das rochas sedimentares, caracterizada pelos valores de resistividade mais baixos e também do embasamento, caracterizado pela zona mais resistiva do modelo de resistividade.

Os resultados evidenciaram algumas informações a cerca da caracterização das unidades sedimentares da bacia de São Francisco. O modelo de densidade mostra um contraste de densidade negativo em profundidades mais rasas, compatível com rochas sedimentares. Há algumas regiões de contraste de densidade positivo entre 10 e 30 m no perfil. Ocorre também um aumento da densidade com a profundidade, provavelmente causado pela compactação da sedimentação. O modelo de magnetização concentra as estruturas lenticulares na parte rasa do modelo com uma média ligeiramente positiva na magnetização, que pode ser devido a presença de unidade intercaladas com maior magnetização. O embasamento é marcado por rochas de contraste de magnetização próximas a 0.0 Amp/m.

O modelo de resistividade caracteriza 3 unidades sedimentares nessa região da bacia. O grupo Bambuí é caracterizado pela camada mais espessa (até 2 km de profundidade) é caracterizada pela zona de baixa resistividade variando entre 10 e 25 ohm.m. Abaixo da região identificada como grupo Bambuí (abaixo de 2 km – figura 2b) observa-se a presença de dois horizontes geoeletricos bastante contínuos. O primeiro possui resistividades de aproximadamente 30 ohm.m e 600 m de espessura. O segundo, mais espesso, com aproximadamente 1800 m de espessura, apresenta resistividades de aproximadamente 100 ohm.m. Apesar de não haver informações de poço que identifique as rochas das formações mais profundas da Bacia de São Francisco (abaixo do Grupo Bambuí), a carta estratigráfica de Zalán e Romeiro-Silva (2007) aponta para os Grupos Macaúbas e Espinhaço.

Os modelos de densidade, magnetização e resistividade obtidos com a metodologia de inversão conjunta sugerem que a profundidade da profundidade da bacia varia de 5 a 10 km nessa região.

Espera-se um melhor resultado nos modelos em regiões mais rasas com a inversão conjunta incluindo os dados sísmicos.

Conclusões

Esse trabalho mostra também um experimento relevante em um contexto regional de exploração e inversão conjunta de MT, gravimetria, magnetometria. Os modelos estimados conjuntamente apresentaram similaridade em sua estrutura. Reproduziram zonas onde todos os dados eram sensíveis, além de contribuir nas zonas em que alguns dados mostraram sensibilidade reduzida.

Este estudo destaca as vantagens da utilização de modelos estruturalmente integrados para interpretações geofísicas.

Os resultados da inversão conjunta utilizando o vínculo de *cross-gradients* (Gallardo e Meju, 2004) mostraram modelos que retrataram zonas de propriedade física menos e mais homogêneas. A ambiguidade característica do problema inverso dos métodos potenciais foi reduzida pela inversão conjunta. Os modelos de densidade e magnetização mostraram a distribuição de densidade e magnetização induzida das rochas sedimentares que compõem a bacia de São Francisco, e principalmente a profundidade e compartimentação do embasamento. As zonas de contraste nulo de densidade e magnetização caracterizaram esse embasamento, que é compatível com os resultados MT. Os pequenos contrastes de densidade e magnetização caracterizam as diferentes rochas sedimentares. Os resultados da inversão conjunta mostraram o Grupo Bambuí com aproximadamente 2000 m de espessura, o Grupo Macaúbas/Paranoá com aproximadamente 600 m de profundidade e finalmente o Grupo Espinhaço com aproximadamente 1500 a 2000 m de profundidade.

Agradecimentos

Agradecemos a ANP para fornecer aos dados gravimétricos, magnetométricos e sísmicos. FFS agradece a bolsa de estudo e S.L.F a bolsa de produtividade, ambas concedidas pelo CNPq.

Referencias

- Alkmim, F. F., Martins-Neto, M. A., 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Cap. II, p. 9-30
- Alpak, F. O., C. Torres-Verdin, C., Habashy, T. M., 2008. Estimation of in situ petrophysical properties from wireline formation tester and induction logging measurements: A joint inversion approach: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 63, 1–17, doi: 10.1016/j.petrol.2008.05.007.
- Auken, E., L. Pellerin, N. B. Christensen, Sorensen, K. 2006, A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods: *Geophysics*, 71, no. 5, G249–G260, doi: 10.1190/1.2335575.

- Banerjee, B., Gupta, S. P. D., 1977. Gravitational attraction of a rectangular parallelepiped: *Geophysics*, 42, 1053–1055, doi: 10.1190/1.1440766.
- Bedrosian, P. A., 2007, MT+ integrating magnetotellurics to determine earth structure, physical state, and processes: *Surveys in Geophysics*, 28, 121–167, doi: 10.1007/s10712-007-9019-6.
- Bhattacharyya, B. K., 1964, Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization: *Geophysics*, 29, 517–531, doi: 10.1190/1.1439386.
- Brandalise L.A. 1980. Projeto Sondagem do Bambuí em Minas Gerais. Belo Horizonte, CPRM/DNPM, relatório final, v.1
- Bosum W. 1973. O levantamento aeromagnético de Minas Gerais e Espírito Santo e sua sequência quanto à estrutura geológica. *Revista Brasileira de Geociências*, 3:149-159.
- Colombo, D., De Stefano, M., 2007. Geophysical modeling via simultaneous joint inversion of seismic, gravity, and electromagnetic data: Application to prestack depth imaging: *The Leading Edge*, 26, 326–331, doi: 10.1190/1.2715057.
- Gallardo, L. A., Meju, M. A., 2003. Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data: *Geophysical Research Letters*, 30, 1658, doi: 10.1029/2003GL017370.
- Gallardo, L. A., 2004. Joint two-dimensional inversion of Geoelectromagnetic and seismic Refraction data with cross-gradients Constraint. 153 p. *Tese (Doutorado)*, Lancaster University, Lancaster, England
- Gallardo, L. A., 2007, Multiple crossgradient joint inversion for geospectral imaging: *Geophysical Research Letters*, 34, L19301, doi: 10.1029/2007GL030409.
- Gallardo, L. A., Fontes, S. L., Meju, M. A., Buonora, M. P., Lugão, P. P., 2012. Robust geophysical integration through structure- coupled joint inversion and multispectral fusion of seismic reflection, magnetotelluric, magnetic, and gravity images: Example from Santos Basin, offshore Brazil, *Geophysics*. 77, 237-251
- Heincke, B., Jegen, M., Hobbs, R., 2006, Joint inversion of MT, gravity and seismic data applied to sub-basalt imaging: *76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 784–789
- Hu, W. Y., Abubakar, A., Habashy, T. M., 2009, Joint electromagnetic and seismic inversion using structural constraints: *Geophysics*, 74, no. 6, R99–R109, doi: 10.1190/1.3246586.
- Kowalsky, M. B., Chen, J., Hubbard, S. S., 2006. Joint Inversion of Geophysical and hydrological data for improved subsurface characterization: *The Leading Edge*, 25, 730–731, doi: 10.1190/1.2210057.
- Lesquer A., Almeida F.F.M., Davino A., Lachaud J.C., Mailard P., 1981. Signification structurale des anomalies gravimetriques de la partie sud du Craton du São Francisco (Brésil). *Tectonophysics*, 76:273-293.
- Marinho F., 1993. Interpretação dos dados gravimétricos e aeromagnetométricos da porção central da Bacia Proterozóica do São Francisco - noroeste do Estado de Minas Gerais. In: SBG, Simpósio do Cráton São Francisco, 2, Salvador, Salvador, Anais, p.170-172
- Moorkamp, M., Heincke, B., Jegen, M., Roberts, A. W., Hobbs, R. W., 2011, A framework for 3D joint inversion of MT, gravity and seismic refraction data: *Geophysical Journal International*, 184, 477–493, doi:10.1111/gji.2010.184.issue-1.
- Newman, G. A., Commer, M., 2010, Joint electromagnetic-seismic inverse modeling for matched data resolution: Presented at the EGM International Workshop.
- Porsani, J.L., 1993. Estudo Magnetotélúrico na Bacia do São Francisco. Relatório Final I. Cenpes/Susep/Segef, 57 p.
- Porsani, J.L.; Fontes, S.L., 2001. O método Magnetotélúrico aplicado a Bacia do São Francisco, Minas Gerais. *Brazilian Journal of Geophysics*, vol. 19 (2), p. 145-154.
- Smith, J. T., Booker, J. R. 1991. Rapid inversion of 2-dimensional and 3-dimensional magnetotelluric data: *Journal of Geophysical Research, Solid Earth and Planets*, 96, 3905–3922, doi: 10.1029/90JB02416.
- Solon, F., Fontes, S., Flexor, J., and Meju, M., 2011. Electromagnetic and seismic images from Sao Francisco Basin - Brazil: oil and gas perspectives?. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011*: pp. 650-654. doi:10.1190/1.3628163
- Teixeira L.B., Martins M., Braun O.P.G., 1993. Evolução geológica da Bacia do São Francisco com base em sísmica de reflexão e métodos potenciais. In: SBG, Simp. Craton São Francisco, 2, Salvador, Atas, 179-181.
- Ussami N., 1981. Interpretação dos dados aeromagnéticos na área compreendida entre 42°-47°W e 15°-19°S (Minas Gerais, Brasil). *Dissertação de Mestrado*, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 119p.
- Vidale, J. 1988 Finite-difference calculation of travel times. *Bull. Seis. Soc. Am.* 78, 2062-2076.

Zalán, P. V., Romeiro-Silva, P. C., 2007. Bacia do São Francisco. Boletim de Geociências da Petrobras. v. 15, n.2, p. 561-571, maio/Nov.