

Sistemas geotérmicos não convencionais a partir de dados multi-físicos na Bacia de São Francisco

Silva, H.T. A. e Solon, F. F., Universidade Federal Fluminense - UFF

Copyright 2023, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 18th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 October 2023.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 18th 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

The present work presents a three-dimensional (3D) reinterpretation of a MT survey carried out in the São Francisco basin with the objective of characterizing the deeper geoelectric structure. Preliminary results suggest that there is a correlation between deeper conductive anomalies with occurrences of HDR (Hot dry rocks). For the next stages of this study, it is intended to use methods that combine MT and geothermal data to characterize high-enthalpy geothermal systems, still little explored in Brazil. This will be possible through empirical relationships and geophysical method integration methodologies (linked and joint inversion), which allow estimating a distribution of electrical conductivity that simultaneously explains the MT data and the temperature variations in the wells.

Introdução

A bacia de São Francisco tem sido estudada há décadas pelo grande potencial exploratório. A ocorrência de vazamentos de gás foi documentada em várias partes da bacia (Romeiro-Silva Zalán 2005; Frédéric et al., 2020; BOLOGNA et al., 2005), indicando que o sistema petrolífero está funcionando e sugerindo uma potencial província de hidrocarbonetos.

Na atual área de estudo (Fig.1), imagens de satélite foram usadas para mapear áreas de infiltração de gás, especialmente nos rios São Francisco, Paracatu e Urucuia (Romeiro-Silva Zalán 2005; Meister et. al. 2007). Curto et al. (2012) aplicaram métodos aerométricos e magnéticos para a detecção de infiltrações de hidrocarbonetos e seus possíveis controles estruturais na área do Remanso do Fogo na confluência dos rios Paracatu e São Francisco. Interpretações sísmicas anteriores de Hercos et al. (2008) sugerem que esta área particular rica em infiltrações é sustentada por um alto estrutural do embasamento. O gás também foi amostrado em vários intervalos nas formações Lagoa do Jacaré e Sete Lagoas no poço 1-RF-1-MG da Petrobras e em zonas de depressão circulares (16°33,605' S; 45°20,620' W) (Prinzhofner et al., 2019) na linha MT1.

O trabalho de Solon et.al (2015), através da inversão 2D de dados magnetotélúricos (MT) e da integração com dados de poço, sísmicos, gravimétricos e magnetométricos, mapeou e caracterizou as propriedades geoeletricas das formações carbonáticas Lagoa do Jacaré e Sete Lagoas

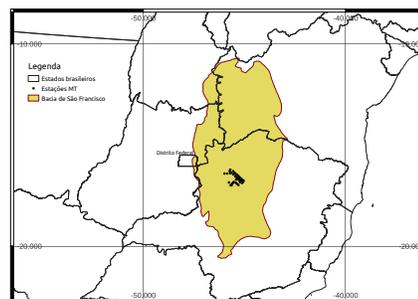


Figure 1: Mapa mostrando as localizações das estações MT na área de estudo na Bacia de São Francisco.

do Grupo Bambuí, que abrigam as rochas geradoras e reservatórios identificadas na história exploratória desta bacia.

Estudos feitos a partir de integração dos dados geotérmicos convencionais com os dados de levantamentos aeromagnéticos (Vieira, 2015) apontam que esta bacia é caracterizada por recursos geotermiais do tipo baixa entalpia até 3 km de profundidade, com possibilidades na exploração de recursos HDR (Hot dry rocks - Rochas quentes secas). Essas rochas costumam apresentar temperaturas maiores que 1500 °C em profundidades menores que 6 km, onde a maior parcela desses recursos se encontra nas bordas da parte sul da bacia. O trabalho de Vieira (2015) destaca o papel dos dados eletromagnéticos na identificação de áreas com potencial geotérmico.

Sistemas geotérmicos são caracterizados por um elevado fluxo térmico e por isso são normalmente investigados através de métodos geotérmicos. Por outro lado, as rochas dos sistemas geotérmicos apresentam grandes variações na condutividade elétrica decorrentes, por exemplo, do conteúdo de água presente nos poros, da porosidade, salinidade do fluido e alteração mineralógica. Assim, a caracterização destes sistemas em termos da distribuição de condutividade elétrica em subsuperfície pode ser feita a partir do método MT.

O presente trabalho apresenta uma reinterpretção tridimensional (3D) de uma pesquisa de MT realizada nessa bacia por Porsani Fontes (1993, 2001), e Solon et al (2015) com o objetivo de caracterizar a estrutura geoeletrica mais profunda da bacia de São Francisco. Os resultados preliminares sugerem que há uma correlação entre anomalias condutivas mais profundas com ocorrências de HDR.

Contexto geológico

A Bacia do São Francisco cobre uma área de 379.357 km² e tem uma espessura máxima de sedimentos de 5.000 m (Alkmim Martins-Neto 2001). 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 classificada como uma bacia policíclica intracratônica, levemente deformada na porção central e mais fortemente deformada em suas bordas. A bacia é preenchida principalmente por rochas clásticas e carbonáticas Neoproterozóicas do Grupo Bambuí. Estudos de Braun et al. (1990) sugerem que os sedimentos pertencentes ao Grupo Bambuí foram formados no Proterozóico Superior (Vendiano), o que torna a Bacia do São Francisco interessante para a prospecção de hidrocarbonetos. De fato, parte dele foi ofertado na 10ª rodada de licitação de blocos de petróleo e gás pela agência brasileira ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) em dezembro de 2008, e um dos blocos está dentro de nossa atual área de estudo. O restante de nossa área de estudo é operado pela estatal brasileira de petróleo, Petrobras.

O Grupo Bambuí é formado por siltes e folhelhos intercalados com calcários e dolomitos, e subdivide-se em seis formações: Três Marias, Serra da Saudade, Lagoa do Jacaré, Serra de Santa Helena, Sete Lagoas e Carrancas. Estas são recobertas pelas rochas sedimentares do Grupo Santa Fé (Carbonífero-Permiano) formadas principalmente pela Formação Uruçuia (Cenomaniano-Maastrichtiano). As formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré são possíveis rochas geradoras de hidrocarbonetos. Os calcários dolomíticos e fraturados da Formação Sete Lagoas, com porosidade secundária, também possuem ricos teores de matéria orgânica e são potenciais reservatórios. Na borda SE da bacia, a presença do quartzito Paranoá, soerguido tectonicamente, pode facilitar a ocorrência de reservatórios arenosos com alguma permeabilidade e porosidade. Possíveis rochas reservatório são encontradas entre os siliciclitos da Megassequência Macaúbas-Paranoá e os carbonatos da Megassequência Bambuí, especialmente em fácies fraturadas e dolomitizadas. As potenciais rochas de vedação seriam folhelhos, margas e calcários do Grupo Bambuí.

O embasamento tectônico da Bacia de São Francisco é constituído essencialmente pelo Cráton de São Francisco, formado por rochas arqueanas e paleoproterozóicas que faziam parte da formação do supercontinente Atlântica (Alkmim e Martins-Neto, 2001). Segundo Almeida (1977), o cráton não fez parte dos processos orogênicos do Evento Brasileiro. Romeiro-Silva e Zalán (2005), através da observação de linhas sísmicas regionais, sugerem que o Cráton de São Francisco deve ter como limite faixas dobradas marginais brasileiras quando envolvendo o embasamento (estilo estrutural thick-skinned).

Metodologia

Os dados MT utilizados neste trabalho foram adquiridos através de sondagens na porção central da Bacia do São Francisco, totalizando quarenta e três estações. As sondagens MT cobriram um intervalo de período de 0,001 a 100 s, sondando a estrutura de resistividade do subsolo até uma profundidade máxima de cerca de

15 km. O levantamento inicial foi feito em etapas por Porsani Fontes (1993, 2001), com sondagens adicionais nos anos seguintes ao longo das linhas de reflexão sísmica captadas pela Petrobras. Os dados deste estudo foram previamente processados e interpretados em relatórios não publicados por Porsani Fontes (1993) e Porsani (1993), e depois apresentados em Porsani Fontes (2001).

Estes estudos anteriores assumem a subsuperfície horizontal e em camadas nas quais a variação de resistividade é apenas na direção vertical. Com os processamentos feitos anteriormente, os dados originais da série temporal não estavam disponíveis para nosso estudo. Apenas o conjunto de dados formado pelas componentes não rotacionados y_x , x_y (direções de medição leste-oeste e norte-sul magnéticas originais) do tensor de impedância puderam ser recuperadas e essas curvas foram usadas para o presente estudo de inversão 3D.

Seja um conjunto de estações MT localizadas na superfície da Terra, em pontos (x_l, y_l, z_l) , $l = 1, \dots, N$. As observações obtidas em cada estação, as medidas de resistividade aparente e fase para cada frequência são agrupadas em um vetor \mathbf{d} denominado vetor de dados observados (eq.1). De forma análoga a equação (eq.1), temos o vetor de dados preditos $\mathbf{d}(\sigma)$ com as componentes x_y e y_x da resistividade aparente e fase para toda as frequências em todas as estações.

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \rho_{xy}(\omega) \\ \phi_{xy}(\omega) \\ \rho_{yx}(\omega) \\ \phi_{yx}(\omega) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Neste trabalho foi realizada a inversão 3D dos dados MT para estimar uma distribuição de resistividade da terra com base em observações reais dos dados MT. No problema inverso MT, procura-se estimar um modelo de condutividade σ que minimiza o resíduo entre o vetor de dados preditos $\mathbf{d}(\sigma)$ e o vetor de dados observados \mathbf{d} . Neste trabalho, este problema não-linear é formulado de acordo com a metodologia proposta por EGBERT e KELBERT (2012) e KELBERT et al. (2014). Esta metodologia consiste em estimar, por meio do método dos gradientes conjugados não lineares (NLCG - conjugate gradients), o vetor de parâmetros σ que minimiza a seguinte função:

$$\Phi(\sigma) = [\mathbf{d} - \mathbf{d}(\sigma)]^T \mathbf{C}_d^{-1} [\mathbf{d} - \mathbf{d}(\sigma)] + \nu [\sigma - \sigma_0]^T \mathbf{C}_\sigma^{-1} [\sigma - \sigma_0] \quad (2)$$

em que \mathbf{C}_d é a matriz diagonal de covariância dos dados, σ_0 é um modelo de referência, ν é o parâmetro de regularização e \mathbf{C}_σ é a matriz de covariância dos parâmetros.

O modelo de inversão resultante foi utilizado como modelo inicial para novas inversões, visando obter um modelo final que apresentasse a melhor resolução possível. Um error floor de 30% de $|dI|^{(1/2)}$ foi atribuído aos dados. O resultado parcial é mostrado a seguir.

Resultado preliminar

No primeiro conjunto de testes, a inversão foi feita respeitando um compromisso entre a resolução e as limitações computacionais, para isso utilizou-se uma

abordagem chamada *NestedGrid*, descrita por MEQBEL et al. (2014). Esta abordagem é utilizada para evitar malhas com um grande número de células, mas, ao mesmo tempo, assegura uma malha suficientemente fina na área de interesse. Além disso, essa abordagem é um método empírico para resolver o efeito da borda. Na abordagem *NestedGrid*, uma malha grosseira é utilizada para calcular o campo elétrico regional. Este campo elétrico é imposto como uma condição de contorno e modelo inicial para uma malha menor, mais restrita à área de interesse.

O modelo maior utilizado é formado por uma malha composta por $70 \times 75 \times 45$ células, atingindo uma profundidade máxima de 480 km. A distância máxima na direção x é de 83.200 km e na direção y é de 102.400 km. Com uma distância mínima entre as estações de 2.200 km e aumentou logarithmicamente com um fator de 1.3 nas regiões das bordas da malha. O tamanho inicial das células na direção z foi de 30 m para as células próximas à superfície e aumentou logarithmicamente com um fator de 1.2.

O primeiro resultado a ser mostrado foi obtido utilizando um modelo inicial homogêneo de $100 \Omega m$. A Figura 2 mostra o resultado da inversão após 160 iterações, com o valor de rms normalizado de 1.723919, representado como uma seção transversal ao longo de um perfil. As posições das estações MT estão plotadas na imagem para ajudar na localização.

O modelo de resistividade (Fig.2) mostra uma zona condutiva que caracteriza o pacote sedimentar de aproximadamente 2km de espessura. Não foi possível diferenciar as rochas carbonáticas das Formações Lagoa do Jacaré e Sete Lagas das demais formações. O embasamento resistivo, de resistividade variando entre 800 a 2000 Ωm , apresenta profundidades que variam entre 2,5 km a 4 km. Vale ressaltar que na região sudoeste do perfil, entre as estações 01 a 22, observa-se um condutor de resistividade variando entre 0.5 a $1 \Omega m$, cortando o embasamento geoeletrico. A figura 3 mostra o modelo de resistividade em uma seção horizontal para a profundidade de 4km. Observa-se que esse condutor se estende lateralmente entre as estações 1, 20, 4 e 27.

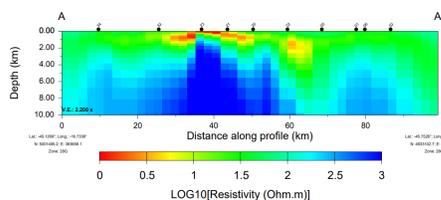


Figure 2: Seção Transversal ao longo de um perfil mostrando a distribuição de resistividade obtida a partir da inversão 3D dos dados MT.

Conclusões

Os resultados preliminares obtidos a partir da inversão 3D dos dados MT permitiu mapear o embasamento cristalino e o pacote sedimentar que caracteriza o Grupo Bambuí. Estima-se que a profundidade do embasamento cristalino na área de estudo varia de 2,5 a 4,0 km.

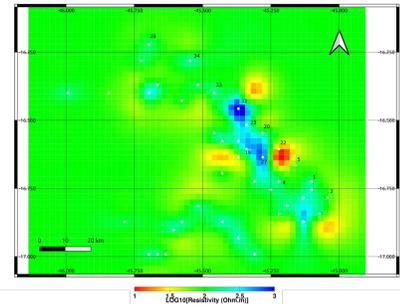


Figure 3: Seção horizontal mostrando a distribuição de resistividade para a profundidade de 4 km obtida a partir da inversão 3D MT.

A inversão 3D ressaltou uma anomalia condutiva no embasamento entre as estações 1 e 22. Os estudos de Solon et al., 2015 sugerem que essa anomalia pode ter relação com um antigo canal coincidente com a posição do atual Rio Paracatu. No entanto, estudos mais recentes identificaram possíveis alvos para os recursos geotérmicos de alta entalpia presentes em rochas quentes e secas (HDR) ou rochas quentes e úmidas (HWR – do inglês hot wet rocks) do embasamento cristalino. Vieira (2015) resalta que a Bacia de São Francisco é um alvo interessante para ocorrências de HDR e mostra um Mapa de Recurso Base e Recuperável da bacia de São Francisco (figura 7.3.2.7 em Vieira, 2015). Observa-se que há uma boa correlação espacial entre a anomalia condutiva evidenciada pela inversão MT 3D (Fig.2 e Fig.3), e a região com possibilidades na exploração de recursos HDR por apresentar temperaturas maiores que $1500^\circ C$ em profundidades menores que 6 km.

Para as próximas etapas do presente estudo, pretende-se utilizar métodos que combinem dados MT e geotérmicos para caracterizar sistemas geotérmicos de alta entalpia, ainda pouco explorados no Brasil. Isso será possível através de relações empíricas e metodologias de integração de métodos geofísicos (inversão vinculada e conjunta), que permitem estimar uma distribuição da condutividade elétrica que explique simultaneamente os dados MT e as variações de temperatura nos poços.

Referências

Alkmim, F.F. Martins-Neto, M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Pinto, C.P. Martins-Neto, M.A. (ed.) Bacia do São Francisco: Geologia e recursos naturais. [The São Francisco Intracratonic Basin: structural framework and evolutionary scenario. In: Pinto, C.P. Martins-Neto, M.A. (ed.) São Francisco Basin: geology and natural resources.] Sociedade Brasileira de Geologia, Belo Horizonte, Brazil, 9–30.

ALMEIDA, F. F. M., 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 7, p. 285-295, 1977.

BOLOGNA, M. S., PADILHA, A. L., VITORELLO, I., 2005, "Geoelectric crustal structures off the SW border of the São Francisco craton, central Brazil, as inferred from a magnetotelluric survey", Geophysical Journal International, v. 162, n. 2 (ago.), pp. 357–370. ISSN: 1365-246X. doi:

10.1111/j.1365-246X.2005.02643.x.

Braun, O.P.G., Mello, U. Della Piazza, H. 1990. Bacias Proterozóicas Brasileiras com perspectivas exploratórias para hidrocarbonetos. In: Raja Gabaglia, G.P. Milani, E.J. (eds) Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. [Proterozoic Brazilian basins with exploratory prospects for hydrocarbons. In: Raja Gabaglia, G.P. Milani, E.J. (eds) Origin and evolution of sedimentary basins.] Petrobras/SEREC/CEN-SUD, Rio de Janeiro, Brazil, 115–132.

Curto, J.B., Pires, A.C.B., Silva, A.M. Crosta, A.P. 2012. The role of airborne geophysics for detecting hydrocarbon microseepages and related structural features: The case of Remanso do Fogo, Brazil. *Geophysics*, 77, B35–B41.

EGBERT, G. D., KELBERT, A., 2012, "Computational recipes for electromagnetic inverse problems", *Geophysical Journal International*, v. 189, n. 1 (abr.), pp. 251–267. ISSN: 1365-246X. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05347.x.

E M. Meister*, M.C. Lobianco, and J. M. Travassos, (2007), "Geophysical and geological evidence of Precambrian evaporites within western São Francisco basin – A working hypothesis for gas and oil exploration to unveil an Earth's secret of central Brazil," SEG Global Meeting Abstracts : 496-501. <https://doi.org/10.1190/sbgf2007-098>

Frédéric-Victor Donzé, Laurent Truche, Parisa Shekari Namin, Nicolas Lefeuvre and Elena F. Bazarkina.2020. Migration of Natural Hydrogen from Deep-Seated Sources in the São Francisco Basin, Brazil. DOI-10.20944/preprints202007.0571.v1

Hercos, M.C., Martins-Neto, M.A. Filho, A.D. 2008. Arcabouço estrutural da bacia do São Francisco nos arredores da Serra da Água Fria (MG), a partir da integração de dados de superfície e subsuperfície. [Structural framework of São Francisco basin around the Serra da Água Fria (MG), through surface and subsurface integration data.] *Revista Brasileira de Geociências*, 38, 197–212.

KELBERT, A., MEQBEL, N., EGBERT, G., et al., 2014, "ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data", *Computers Geosciences*, v. 66 (may), pp. 40–53. ISSN: 0098-3004. doi: 10.1016/j.cageo.2014.01.010.

Porsani, J.L. 1993. Estudo Magnetotelúrico na Bacia do São Francisco. [Magnetotelluric studies in São Francisco basin.] Final Report, Cenpes/ Susep/Segef, 57.

Porsani, J.L. Fontes, S.L. 1993. Estrutura Geo-Elétrica da Bacia do São Francisco pelo Método Magnetotelúrico. [Geoelectric structure of São Francisco basin through Magnetotelluric method.] In: Salvador-B.A. (ed.) Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, Vol. 1. SBG, Salvador, Brazil, 173–175.

Porsani, J.L. Fontes, S.L. 2001. O Método Magnetotelúrico Aplicado a Bacia do São Francisco, Minas Gerais. [The Magnetotelluric method applied to the São Francisco basin, Minas Gerais.] *Revista Brasileira de Geofísica*, 19, 145–154.

Prinzhofer, A.; Moretti, I.; Francolin, J.; Pacheco, C.;

d'Agostino, A.; Werly, J.; Rupin, F. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure. *Int. J. Hydrogen Energy* 2019, 44, 5676–5685.

ROMEIRO-SILVA, P. C.; ZALÁN, P. V. Contribuição da sísmica de reflexão na determinação do limite oeste do Cráton do São Francisco. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 3., 2005, Salvador. Anais. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia. 2005. p. 44-47. Expanded abstract. in: Pedro Víctor Zalán, Paulo César Romeiro Silva. Bacia do São Francisco. B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 561-571

Solon, F.F.; Fontes, S.L.; Meju, M.A., 2015. Magnetotelluric imaging integrated with seismic, gravity, magnetic and well-log data for basement and carbonate reservoir mapping in the São Francisco Basin, Brazil. *Petroleum Geoscience*, (jan.), pp. 2013–013. ISSN: 1354-0793, 2041-496X. doi: 10.1144/petgeo2013-013.

Vieira, Fábio Pinto, 2015. Energia geotérmica de média e alta entalpia no Brasil: Avaliações de recursos e perspectivas de aproveitamento/Fábio Pinto Vieira.-Rio de Janeiro:ON/MCTI, 2015. 257p.

MEQBEL, N., EGBERT, G., WANNAMAKER, P., et al., 2014, "Deep electrical resistivity structure of the northwestern U.S. derived from 3-D inversion of USArray magnetotelluric data", *Earth and Planetary Science Letters*, v. 402, pp. 290–304. doi: 10.1016/j.epsl.2013.12.026.