

Compartimentação magnética-estrutural e conectividade dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani na região central do estado do Paraná, sul do Brasil

Alessandra de Barros e Silva*, LPGA/UFPR, Brasil

Francisco José Fonseca Ferreira, LPGA/UFPR, Brasil

Copyright 2007, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 10th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 November 2007.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 10th 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 research has been discuss a structured area in central Paraná State, southern Brazil, delimited by coordinates 24°00' - 25°00' S and 51°00' - 53°00' W with just about 23,000 km². The study involves GIS integration of aerogeophysical, geological, structural lineaments (DEM and Landsat imagery), hydrogeological and hydrochemical data. Basalts flows and diabase dykes (NW-SE) of the Serra Geral Formation (Lower Cretaceous) predominate in the studied area. These rocks correspond to the overlying Serra Geral Aquifer System (SGAS-fractured). The purpose of the study is processing and interpretation aeromagnetic data from various techniques, useful for enhance shallow and deep sources. The integration with others remote sensing and geological data to make possible to outline the regional structural framework. Finally, the study investigated the structural control of both flow and chemistry of SGAS groundwater and also to identify fractures that might represent hydraulic connection zones to the underlying Guarani Aquifer System (GAS-granular).

Introdução

A presente pesquisa investigou uma área estruturada na região central do estado do Paraná, sul do Brasil, delimitada pelas coordenadas 24°00' - 25°00' S e 51°00' - 53°00' W, com aproximadamente 23.000 km² (Figura 1). O estudo envolveu integrações em Sistema de Informações Geográficas (SIG) de dados aerogeofísicos, geológicos, estruturais (MDE e imagens Landsat), hidrogeológicos e hidroquímicos. Lavas basálticas e diques de diabásio (NW-SE) da Formação Serra Geral (Cretáceo Inferior) predominam na área estudada (Figura 2). Estas rochas correspondem ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG-fraturado). O objetivo do trabalho foi compor um arcabouço estrutural da área de estudo, com base nos dados anteriores, e confrontá-lo com a distribuição espacial de dados hidrogeológicos e hidroquímicos. Como decorrência, procurou-se discutir o controle estrutural do fluxo e do quimismo das águas subterrâneas do SASG e identificar zonas de fraturas e

falhas supostamente representativas de conexão hidráulica dos sistemas aquíferos Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG-granular), subjacente.

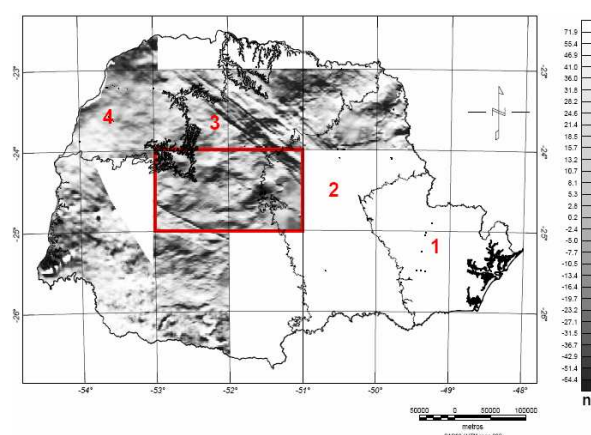


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo no contexto do mapa magnético parcial do Fanerozóico do estado do Paraná (Simões Neto et al., 2007). 1 - Embasamento Pré-cambriano; 2 - Rochas sedimentares paleozóicas; 3 - Formação Serra Geral (Cretáceo Inferior, basaltos e diques - SASG); 4 - Grupo Caiuá (Cretáceo Superior, arenitos).

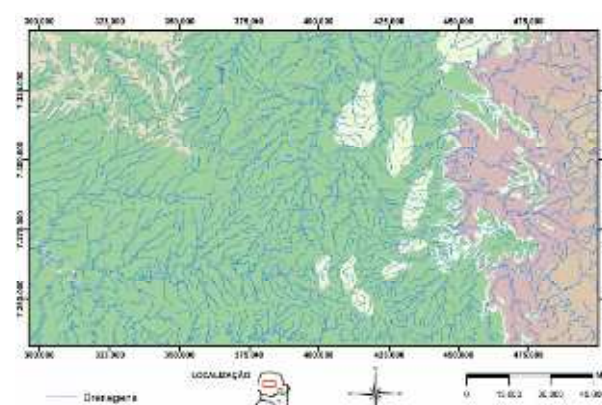


Figura 2 – Mapa geológico indicando a rede de drenagem e a predominância da Formação Serra Geral (verde) na área de estudo.

Material e métodos

A determinação do arcabouço estrutural da área foi baseada em dois níveis de investigação: superfície e subsuperfície. Para a geração do arcabouço de superfície foram contemplados os lineamentos de Soares et al. (1982) e Zalán et al. (1987, 1990), em correspondência à análise morfoestrutural da rede de drenagem (Figura 2), à interpretação do Modelo Digital de Elevação (MDE, Figura 3, Shuttle Radar Topography Mission, NASA-SRTM-USGS), de imagens Landsat 7 ETM⁺ (composição R5G4B3) e do mapa hipsométrico (Figura 4).

O mapa estrutural de subsuperfície foi fundamentado no processamento e na interpretação dos dados aeromagnéticos provenientes do Projeto Aerogeofísico Rio Iguaçu, cuja altura de vôo foi de 500 metros, direção e espaçamento das linhas de vôo, respectivamente, N-S e 2000 metros (Petrobras, 1981). Os principais métodos de realce de anomalias magnéticas utilizados foram os seguintes: gradiente vertical (Evjen, 1936); sinal analítico (Nabighian, 1972, 1974, 1984; Hsu et al., 1996; Roest et al., 1992; Debeglia & Corpell, 1997; Li, 2006); continuações ascendentes (e.g. Gunn, 1975); gradientes

horizontais (Cordell & Grauch, 1985); gradiente horizontal total (Cordell & Grauch, 1985), fase ou inclinação do sinal analítico (Miller & Sing, 1994a,b); gradiente horizontal total realçado (Fedi & Florio, 2001), gradiente horizontal total da fase do sinal analítico (Verduzco et al., 2004); Theta map (Winjs et al., 2005); sinal analítico composto (Debeglia et al., 2006).

Por comparação, em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), os modelos estruturais de superfície e subsuperfície foram harmonizados em um arcabouço comum.

Com respeito à hidrogeologia, foram avaliadas as profundidades das perfurações, a potenciometria, a vazão e a capacidade específica de 185 poços de exploração completados na Formação Serra Geral. Com base nas análises químicas de 102 amostras, com erro de balanço iônico inferior a 11%, foi possível discutir a distribuição espacial do potencial hidrogeniônico (pH), dos sólidos totais dissolvidos (STD), dos cátions – Na²⁺ + K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e dos ânions – Cl⁻, HCO₃⁻ + CO₃²⁻, SO₄²⁻, em correspondência ao arcabouço estrutural integrado. Por meio do confronto dos mapas hidrogeológicos, hidroquímicos e do arcabouço final, também procurou-se avaliar o condicionamento estrutural das zonas de mesclagem das águas dos SASG e SAG, assim como a compartimentação destes sistemas aquíferos.

Resultados

Processamento dos dados aeromagnéticos

Inicialmente os dados foram organizados em malhas regulares de 500x500 metros e posteriormente micronivelados (Figura 5), no sentido de remover ruídos e dados espúrios. Após esta etapa, a malha micronivelada foi continuada para cima (1000, 2000 e 5000 metros), no sentido de verificar a persistência de algumas feições em profundidade. A Figura 6 mostra o mapa magnético resultante da continuação para 2000 metros.

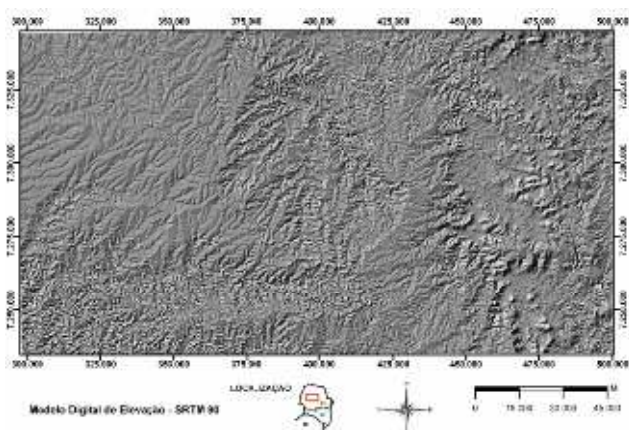


Figura 3 – Modelo digital de elevação da área de estudo.

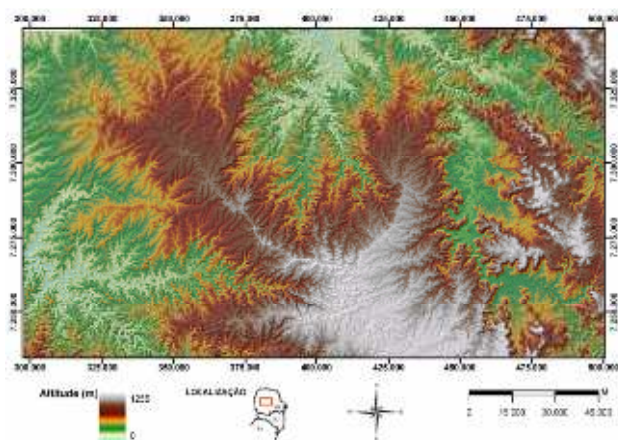


Figura 4 – Mapa hipsométrico da área de estudo.

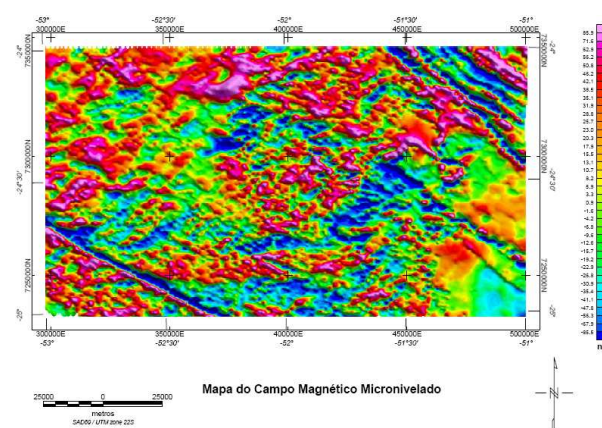


Figura 5 – Mapa magnético residual micronivelado.

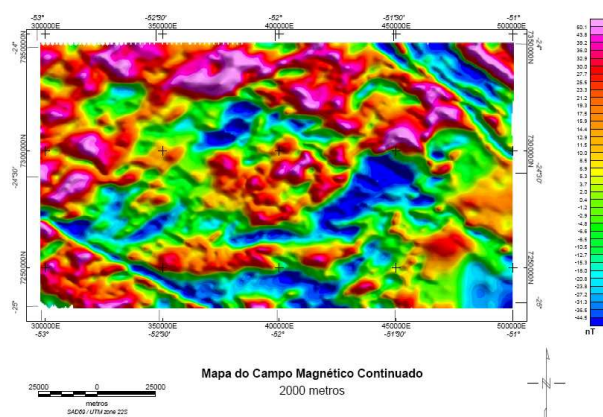


Figura 6 – Mapa magnético continuado para 2000 m.

Em seguida, dentre outros, foram aplicados a partir da malha continuada para 2000 metros, o gradiente horizontal total (GHT) e a amplitude do sinal analítico (ASA), conforme respectivamente (Equações 1 e 2) as Figuras 7 e 8.

$$\text{GHT} = [(d_x)^2 + (d_y)^2]^{1/2} \quad (\text{Eq.1})$$

$$|\text{ASA}| = [(d_x)^2 + (d_y)^2 + (d_z)^2]^{1/2} \quad (\text{Eq.2})$$

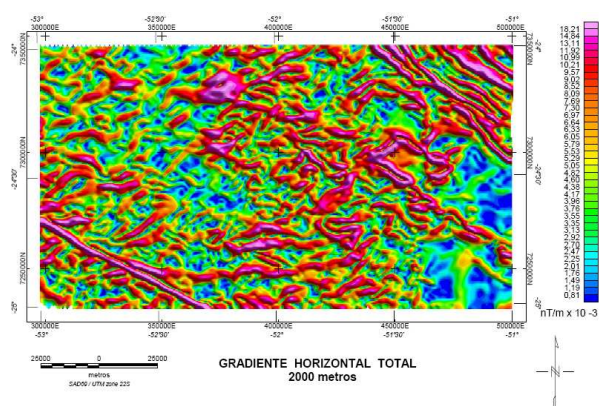


Figura 7 – Mapa do gradiente horizontal total calculado a partir do campo magnético continuado para 2000 metros.

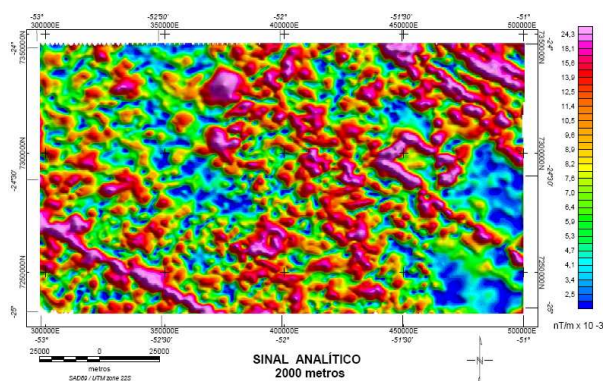


Figura 8 – Mapa da amplitude do sinal analítico calculado a partir do campo continuado para 2000 m.

Foram gerados mais de cinquenta de mapas de realce de anomalias, para as várias continuações para cima, de acordo com os métodos já referidos, a partir dos quais foram interpretados lineamentos. A Figura 9 mostra todos os lineamentos superpostos. Com base nesta última figura e incorporando as feições derivadas do modelo de superfície, foi gerado o arcabouço integrado (Fig. 10). A partir da definição deste arcabouço estrutural-magnético comum, objetivou-se avaliar as possíveis influências das estruturas na circulação das águas do SASG, assim como identificar zonas de conexão com o SAG. De acordo com Rosa Filho *et al.* (1987), a influência de águas do SAG em fontes naturais e poços perfurados na Formação Serra Geral, é caracterizada por teores maiores de sódio, pH alcalinos, altos teores de STD (sólidos totais dissolvidos) e pelas temperaturas acima de 22°C, assim como pela tipologia das águas, ou seja, águas típicas do SASG seriam bicarbonatadas cálcicas e cálcio magnesianas, enquanto as águas do SASG que encerram conectividade com o SAG seriam bicarbonatadas cálcio sódicas e bicarbonatadas sódicas.

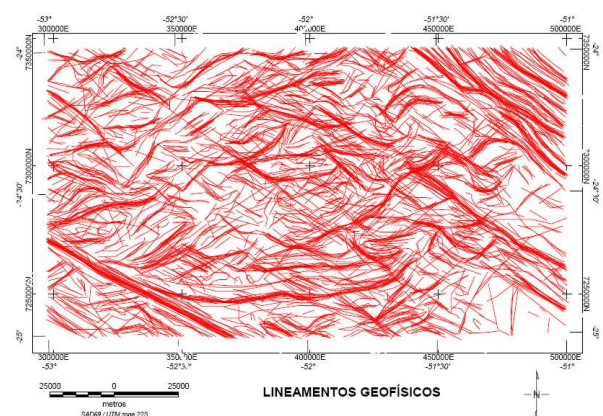


Figura 9 – Mapa de lineamentos geofísicos.

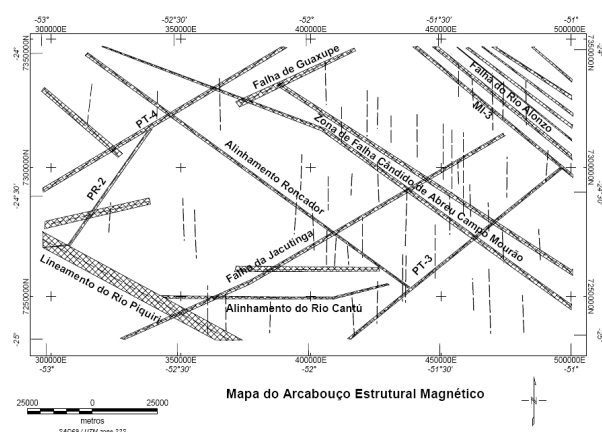


Figura 10 – Mapa do arcabouço estrutural integrado.

Processamento dos dados hidroquímicos e integração geofísico-geológica

O diagrama de Piper da Figura 11 mostra a composição das águas das amostras analisadas, assinalando-se os grupos sugeridos por Fraga (1992), conforme indicado abaixo:

Grupo (I) - águas bicarbonatadas cálcicas. Esta fácies é a que melhor exprime as características do SASG.

Grupo (II) - águas bicarbonatadas sódicas. Este grupo representa amostras onde existe conexão hidráulica dos SASG e SAG.

Grupo (III) - águas bicarbonatadas cálcio magnesianas. Indica uma fácies do SASG com maior concentração de sais, característica de áreas com elevado grau de confinamento e distantes das zonas de recarga.

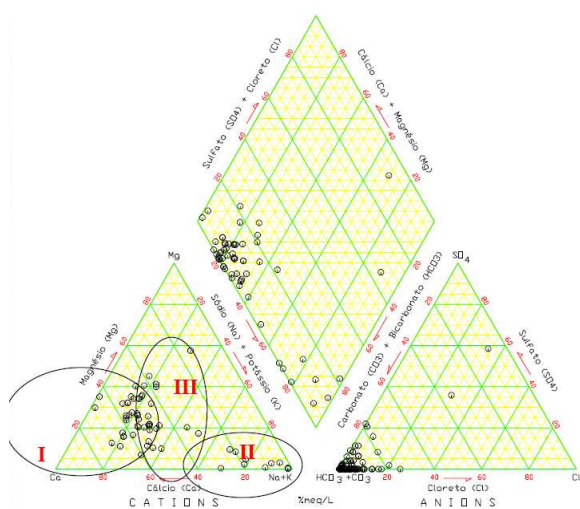


Figura 11 – Diagrama de Piper das amostras analisadas.

No sentido de espacializar os dados da Figura 11 e avaliar a eventual influência das estruturas na composição dos fluidos, foi construída a Figura 12, a qual identifica os poços cujas águas exibem características hidroquímicas e hidrogeológicas típicas do SASG e de misturas com o SAG sotoposto. Desta forma, na Figura 13, pode ser observada a principal zona de conectividade dos sistemas aquíferos, a qual é delimitada por uma estruturação romboédrica característica da Bacia do Paraná no Brasil.

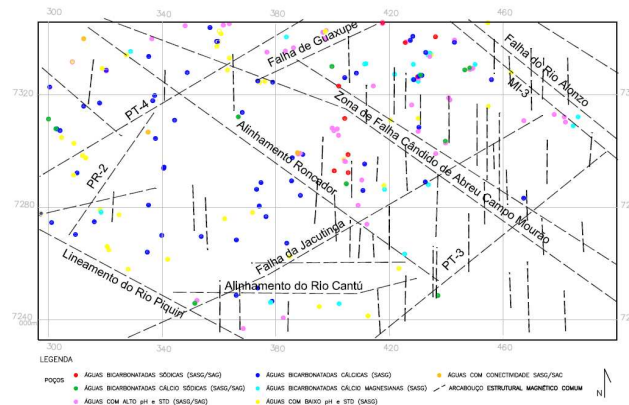


Figura 12 - Mapa de composição química das águas.

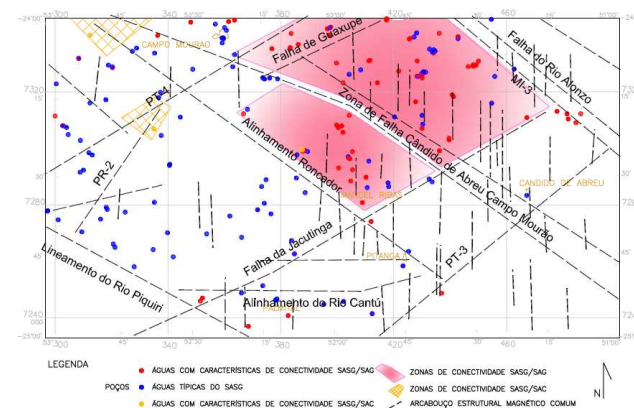


Figura 13 – Mapa indicativo da principal zona de conectividade hidráulica dos SASG e SAG.

Conclusões

- 1) A utilização de técnicas modernas de processamento de dados aeromagnéticos em regiões fortemente magnetizadas, mostrou-se eficaz no delineamento do arcabouço estrutural profundo, em correspondência a lineamentos de superfície extraídos de outros sensores. Desta forma, foi possível refinar a megaestruturação da área de estudo (Fig. 10).
- 2) A distribuição espacial dos dados hidrogeológicos e hidroquímicos sugere um condicionamento regional à megaestruturação proposta.
- 3) A interpretação das assinaturas hidroquímicas permitiu discriminar regiões de predominância de águas típicas do SASG, daquelas de possível conectividade com o SAG.
- 4) Tais fatos são circunscritos a compartimentos estruturais romboédricos limitados, principalmente, por tendências NE e NW.
- 5) Na ausência de dados hidroquímicos devidamente balanceados, altos índices de pH e STD podem ser indicativos de conexão hidráulica dos aquíferos avaliados.
- 6) Finalmente, as evidências hidrogeológicas, hidroquímicas e geofísico-estruturais conduzem a que se caracterize um sistema aquífero híbrido com diferentes taxas de mesclagem das águas dos SASG e SAG.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobras, a Sanepar e a Suderhsa pela cessão dos dados aerogeofísicos, hidrogeológicos e hidroquímicos, respectivamente. Francisco J. F. Ferreira agradece ao CNPq (processo 470689/2004-8) pelo apoio financeiro, sem o qual este trabalho não poderia ter sido desenvolvido.

Referências

Cordell, L. & Grauch, V. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New México. In: W. Hinze, ed., *Utility of regional gravity and magnetic maps*. SEG, 181-197.

Debeglia, N. & Corgel, J. 1997. Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives. *Geophysics*, 62, 87-96.

Debeglia, N., Martelet, G., Perrin, J., Truffert, C., Ledru, P., Tourliere, B. 2006. Semi-automated structural analysis of high resolution magnetic and gamma ray spectrometry airborne surveys. *Journal of Applied Geophysics*, 58, 13-28.

Evjen, H. M. 1936. The place of vertical gradient in gravitational interpretations. *Geophysics*, 1, 127-136.

Fedi, M. & Florio, G. 2001. Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method: *Geophysical Prospecting*, 49, 40-58.

Fraga, C. G. 1992. Origem de fluoretos em águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Botucatu e Serra Geral. São Paulo, 177 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP).

Gunn, P. J. 1975. Linear transformations of gravity and magnetic fields. *Geophysical Prospecting*, 23, 300-312.

Hsu, S. -K., Coppens, D., Shyu, C. T. 1996. Depth to magnetic source using the generalized analytical signal. *Geophysics*, 63, 1947-1957.

Li, X. 2006. Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71, L13-L16.

Miller, H. G. & Sing, V. 1994a. Semiquantitative techniques for the removal of directional trends from potential field data. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 199-211.

Miller, H. G. & Sing, V. 1994b. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.

Nabighian, M. N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507-517.

Nabighian, M. N. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39, 85-92.

Nabighian, M. N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transform: Fundamental relations. *Geophysics*, 49, 780-786.

Petrobras, 1981. Projeto Aerogeofísico Rio Iguaçu. Consórcio CESP-IPT, Paulipetro (dados digitais).

Roest, W. R., Verhoef, V., Pilkington, M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116-125.

Rosa Filho, E. F., Salamuni, R., Bittencourt, A. V. L. 1987. Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos do estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, 37, 22-52.

Simões Neto, J. A., Ferreira, J. F. F., Silva, A. B. 2007. Mapa magnético parcial do Fanerozóico do estado do Paraná (neste congresso).

Soares, P. C., Barcellos, P. E., Csordas, S. M., Mattos, J. T., Balieiro, M. G.; Meneses, P. R., 1982. Lineamentos em imagens Landsat e Radar e suas implicações no conhecimento tectônico da Bacia do Paraná. II Simpósio de Sensoriamento Remoto, CNPq-INPE, Brasília.

Verduzco, B., Fairhead, C.; Green, C., Mackenzie, C. 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23, 116-119.

Winjs, C., Perez, C., Kowalczyk, P. 2005. Theta map: edge detection in magnetic data. *Geophysics*, 70, L39-L43.

Zalán, P. V., Wolf, S., Conceição, J. C. J., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Appi, V. T., Zanotto, O. A., 1987. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, III, Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 441-473.

Zalán, P. V., Wolf, S., Conceição, J. C. J., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Appi, V. T., Neto, E. V. S., Cerqueira, J. R., Marques, A. 1990. The Paraná Basin, Brazil. In: *Interior Cratonic Basins*, Leighton et al. (coords). AAPG Memoir, 51, 681-708.