

Processamento e interpretação de dados aeromagnéticos da região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná)

Carlos Vieira Portela Filho e Francisco José Fonseca Ferreira Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada-LPGAUFPR

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

Residual aeromagnetic data arranged into regular 500 x 500 m grids from 2-km-spaced N-S, 450 m high flight lines were microleveled and processed. The horizontal gradient, analytical signal amplitude and phase and Euler deconvolution maps were qualitatively interpreted. The results led to the establishment of a structural-magnetic framework for the central portion of the Ponta Grossa Arch (Parana Basin, Brazil), where prominent NW-SE structures reflect a thick swarm of diabase dykes, as well as other secondary NE-SW and E-W trends (N-S trend were revealed from digital elevation model).

Introdução

O Arco de Ponta Grossa é uma das mais expressivas feições tectônicas da porção sul-oriental da América do Sul. Delineado como uma megaestrutura soerguida - mergulha para NW no sentido do interior da Bacia do Paraná - é caracterizado por cinco alinhamentos estruturais-magnéticos com extensões não inferiores a 600 km e larguras variáveis entre 20 e 100 km (Figura 1). Definido na sua forma atual com base em dados aeromagnetométricos, de imagens Landsat/TM5 e geológicos, o Arco de Ponta Grossa é limitado a nordeste pelo Alinhamento de Guapiara (Ferreira *et al.*, 1981), a sudoeste pelo Alinhamento do Rio Piquiri, sendo sua região central balizada pelos alinhamentos São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo (Ferreira, 1982). Almeida (1982) reconheceu, com base em dados de sensores remotos e geológicos, o Alinhamento do Rio Ivaí, situado entre os alinhamentos do Rio Piquiri e do Rio Alonzo (Figura 1). Tais alinhamentos encerram espessos enxames de diques de diabásio, do Cretáceo Inferior (Renne *et al.*, 1992, Turner *et al.* 1994), dirigidos preferencialmente segundo NW-SE, mas também à E-W e NE-SW, mergulhos subverticais e comprimentos de até 100 km. As espessuras dos diques oscilam, em média, entre 20-50 m, podendo atingir até 600 m, enquanto a frequência média é de 1,5 diques/km e, as vezes, até de 4 diques/km (Marini *et al.*, 1967). Além dos diques, os alinhamentos ensejaram a colocação de rochas alcalinas (Ferreira e Algarte, 1979; Almeida, 1983).

O presente trabalho mostra os resultados obtidos através do processamento e interpretação de dados aeromagnetométricos de uma região central do Arco de

Ponta Grossa (Figura 1), e tem como objetivo propor um arcabouço estrutural-magnético, o qual foi cotejado com dados hidrogeológicos e hidroquímicos, visando avaliar a conexão hidráulica entre os aquíferos Serra Geral e Guarani (Portela Filho *et al.* 2002).

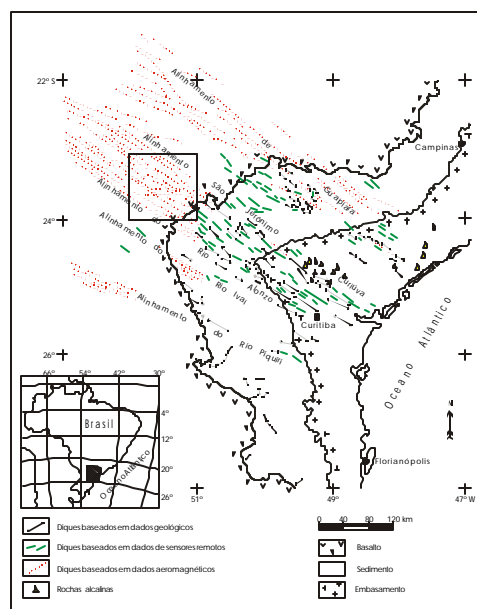


Figura 1 – Configuração do Arco de Ponta Grossa indicando a área estudada (modificado de Almeida, 1983)

A área do estudo, limitada pelas coordenadas geodésicas 23°00' e 24°00' de latitude sul e 51°00' e 52°00' de longitude oeste, está incluída no Projeto Aerogeofísico Rio Ivaí (Petrobrás, 1981), o qual foi realizado pela Paulipetro, Consórcio CESP-IPT, durante o período de fevereiro a março de 1981, recobrimo uma área próxima de 48.840 km², segundo linhas igualmente espaçadas de 2.000 m na direção N-S, altura de voo de 450 m, com amostragem em intervalos de aproximadamente 66 m. Também foram realizadas linhas de controle espaçadas de 20.000 m e com direção perpendicular às linhas do levantamento. Os dados do projeto foram originalmente tratados e corrigidos dos erros de posicionamento, nivelamento das linhas, deriva de voo e remoção do IGRF – *International Geomagnetic Reference Field*.

Pré-processamento

Na etapa de pré-processamento, os dados foram regularizados segundo malhas de 500x500 m, através dos métodos da curvatura mínima, da triangulação com interpolação linear e bidirecional, optando-se pelo primeiro após avaliação estatística dos resultados. Em seguida, os mesmos foram submetidos a uma inspeção visual para eliminar os artefatos e anomalias espúrias ao

longo das linhas de vôo, através de técnicas de micronivelamento. Foram testados dois métodos, Minty (1991) e Geosoft (2001), selecionado-se o segundo (Figura 2) em função de exibirem maiores comprimentos de onda (menores ruídos), portanto mais adequados para aplicação de técnicas de realce de anomalias rasas, não obstante a relativa perda de resolução.

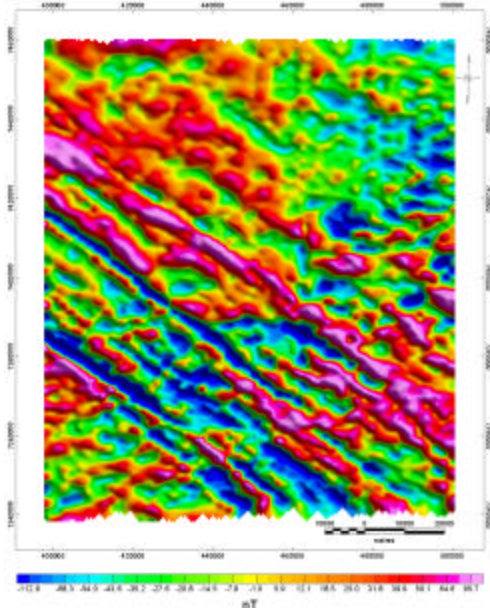


Figura 2 – Mapa magnético micronivelado.

Processamento

O processamento dos dados foi baseado nas técnicas do gradiente horizontal, amplitude e fase do sinal analítico e deconvolução de Euler, cujos resultados são mostrados a seguir:

Gradiente horizontal

As derivadas permitem uma análise da geometria da superfície da malha regular, indicando mudanças abruptas no declive do campo magnético, que podem ser ocasionadas por um salto no valor médio ou pela presença de um pico nos dados. São baseadas no cálculo do gradiente (1ª derivada) ou na sua razão de mudança (2ª derivada). O gradiente horizontal de ordem zero é o vetor resultante da combinação das primeiras derivadas horizontais nas direções x e y, dado pela equação abaixo:

$$h(x,y) = [(M_x)^2 + (M_y)^2]^{1/2} \quad (1)$$

onde $M_x = \partial M / \partial x$ e $M_y = \partial M / \partial y$ correspondem às derivadas horizontais da anomalia M do campo magnético.

Este processo envolve uma transformação de fase e um realce das altas frequências. A transformação de fase geralmente expressa os picos das anomalias, os quais são localizados aproximadamente sobre as bordas de corpos espessos, enquanto o realce das altas frequências proporciona um estreitamento destes picos, amplificando a definição das bordas dos corpos (Milligan e Gunn, 1997). O gradiente horizontal, em geral, é utilizado para delinear os limites dos corpos e estruturas

causadoras das principais anomalias, além de funcionar como um método de separação regional-residual. O detalhamento das estruturas é maior quando se aplicam derivadas de ordens superiores, porém também são realçados os ruídos. Nesta análise foi utilizado o gradiente horizontal de ordem zero (Figura 3).

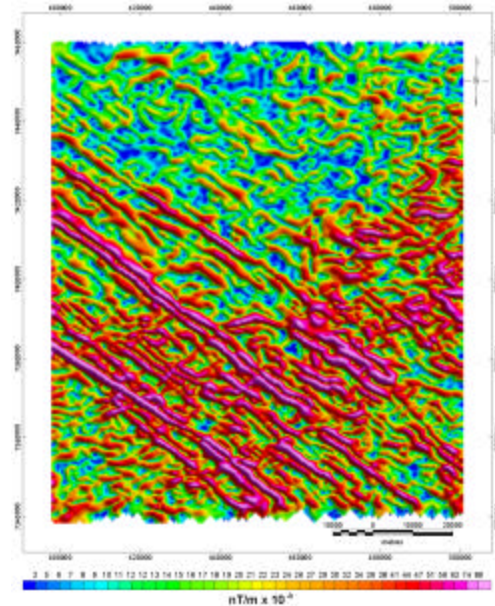


Figura 3 – Mapa do gradiente horizontal de ordem zero.

Amplitude e fase do sinal analítico

O sinal analítico corresponde a uma grande variedade de métodos automáticos ou semi-automáticos, baseados no uso de gradientes (derivadas) horizontais e vertical de anomalias de campos potenciais. A noção de sinal analítico foi definida inicialmente como um “campo complexo derivado de um campo potencial” (Nabighian, 1972). Este método não requer um conhecimento prévio da direção de magnetização e não necessita do processamento de redução ao pólo (Hsu *et al.*, 1998).

Para estruturas 2-D, o método assume que as fontes apresentam magnetização uniforme e podem ser representadas por seções transversais de polígonos, onde estas estruturas podem também ser consideradas como a superimposição de um número finito de contatos magnéticos.

Na análise 3-D o sinal analítico simples é definido em Nabighian (1984), como:

$$A(x,y) = (\partial M / \partial x \mathbf{x} + \partial M / \partial y \mathbf{y} + \partial M / \partial z \mathbf{z})$$

onde \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} são os vetores unitários nas direções x, y e z. A função amplitude do sinal analítico, ou seu valor absoluto, pode ser expressa por um vetor adição de duas componentes reais nas direções x e y e uma componente imaginária na direção z, conforme a equação:

$$|A(x,y)| = [(M_x)^2 + (M_y)^2 + (M_z)^2]^{1/2}$$

onde M é a anomalia do campo potencial; $M_z = \partial M / \partial z$ é a primeira derivada vertical; $M_x = \partial M / \partial x$ e $M_y = \partial M / \partial y$ são as primeiras derivadas horizontais segundo x e y.

A amplitude do sinal analítico é uma função simétrica em formato de sino (*bell shaped*), com seu máximo exatamente sobre o topo de cada contato, e sua largura relacionada diretamente com a profundidade do corpo. Como isto é verdade para qualquer ordem de derivadas do sinal (Nabighian, 1974), estas propriedades podem ser utilizadas para localizar os contatos magnéticos e suas profundidades. Tais características invariáveis são vantajosas na interpretação magnética, especialmente quando a contribuição da magnetização induzida ou remanescente não pode ser distinguida (Hsu *et al.*, 1996). As variações na amplitude do sinal analítico podem ser corrigidas reduzindo-se as anomalias ao pólo, porém isto reduz a força do método (Roest *et al.*, 1992).

Com o processamento de derivadas da amplitude do sinal analítico, ao invés da amplitude do sinal original, obtém-se uma separação mais eficiente das anomalias causadas por estruturas que estejam muito próximas (Debeglia e Coppel, 1997). As amplitudes de n-ésima ordem de derivação podem ser expressas igualmente em termos das derivadas verticais ou horizontais (eq. 2 e 3):

$$|A(x,y)| = [(\partial M_n^z / \partial x)^2 + (\partial M_n^z / \partial y)^2 + (\partial M_n^z / \partial z)^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$|A(x,y)| = [(\partial M_n^h / \partial x)^2 + (\partial M_n^h / \partial y)^2 + (\partial M_n^h / \partial z)^2]^{1/2} \quad (3)$$

A máxima amplitude do sinal analítico, simples ou realçado, é dependente da intensidade de magnetização, do mergulho e da direção do corpo. Esta amplitude torna-se pequena quando a estrutura está próxima do equador ou quando a direção é aproximadamente paralela ao norte magnético (Roest *et al.*, 1992).

A fase do sinal analítico é uma extensão da teoria proposta por Nabighian (1984). Thurston e Smith (1997), demonstraram que a fase permite a estimativa do mergulho e do contraste de susceptibilidade das fontes causadoras das anomalias. A fase do sinal analítico é definida pelo ângulo formado entre os vetores imaginário e real do sinal analítico da mesma ordem, ou seja, representa o quociente resultante da primeira derivada vertical pelo gradiente horizontal:

$$\tilde{O}(x,y) = \arctg(M_z) / [(M_x)^2 + (M_y)^2]^{1/2}$$

A amplitude do sinal analítico pode sofrer variações dentro de uma mesma estrutura, dificultando por vezes a identificação de sua continuidade. Quando se comparam a amplitude com a fase do sinal analítico pode-se interpretar com maior segurança a continuidade da estrutura magnética, pois mesmo variando a amplitude sua fase permanece constante. Uma interpretação da fase em separado torna-se bastante ambígua devido ao fato de que o mapa desta propriedade atribui pesos semelhantes para as estruturas de interesse e também para os ruídos que ocorrem na área. As figuras 4 e 5 representam, respectivamente, os mapas da amplitude e da fase do sinal analítico simples.

Deconvolução de Euler

A deconvolução de Euler (Thompson, 1982; Reid *et al.*, 1990) é comumente empregada na interpretação magnética, porque ela requer pouco conhecimento *a priori* sobre a geometria da fonte e não necessita de informação a respeito do vetor magnetização. O método é

baseado na aplicação da equação homogênea de Euler, a qual relaciona o campo potencial e seus gradientes para localizar a fonte, com base no grau de homogeneidade η . Tal grau pode ser interpretado como um índice estrutural, relacionado a natureza da fonte, derivando-se, a partir de uma janela móvel com η fixo, o posicionamento e a profundidade dos corpos. A quantidade de soluções resultante, normalmente, é muito grande, pois cada uma delas está relacionada com uma determinada posição da janela móvel. O critério apresentado por Thompson (1982), para reduzir o número de soluções possíveis e para estimar, ao mesmo tempo, o índice estrutural, é considerado muitas vezes ambíguo para levantamentos de detalhe (Barbosa *et al.*, 2000).

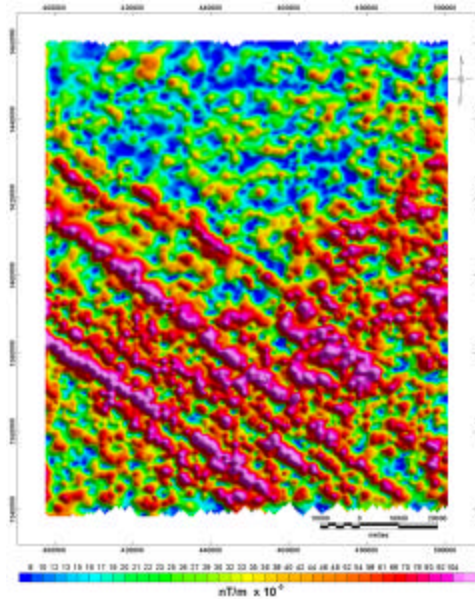


Figura 4 – Mapa da amplitude do sinal analítico.

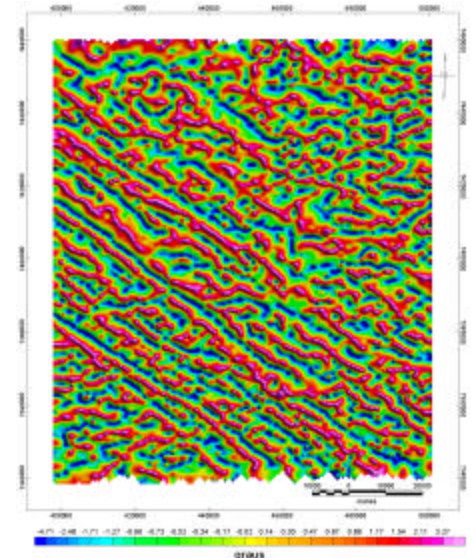


Figura 5 – Mapa da fase do sinal analítico.

A deconvolução de Euler pode ser aplicada para vários índices estruturais, sobretudo em áreas magneticamente

complexas, onde coexistam vários modelos, produzindo soluções de posicionamentos e profundidades variadas. Caberá ao intérprete a seleção dos resultados mais coerentes com a realidade geológica.

A aplicação do método foi realizada através do programa *Grdepth* (Geosoft, 1994). Como observado na análise espectral (Portela Filho, 2003), a área do estudo é constituída por três tipos de fontes principais: profundas ($\lambda > 25$ km), intermediárias ($1.7 > \lambda < 25$ km) e rasas, onde nesta última estão associados ruídos de alta freqüência. Dessa maneira aplicou-se um filtro passa-banda para isolar as anomalias relativas às fontes intermediárias, visando uma maior detalhamento das profundidades deste nível.

Considerando o formato de dique tabular de comprimento infinito como a fonte anômala mais proeminente na área, utilizou-se um fator estrutural $\eta = 1$ (modelo de dique), adotando-se uma tolerância de 10% para o posicionamento e profundidade das fontes. Foram adotados três tamanhos de janela de busca: 2.500, 5.000, 10.000 metros, visando determinar soluções de fontes cada vez mais profundas. Os mapas gerados a partir destes parâmetros mostraram um bom ajuste com os círculos representativos dos resultados do modelo alinhados ao longo da estrutura. A Figura 6 mostra o mapa de profundidades de fontes gerado a partir de janelas de 5.000 m, enquanto a Figura 7 exibe o histograma de sua distribuição.

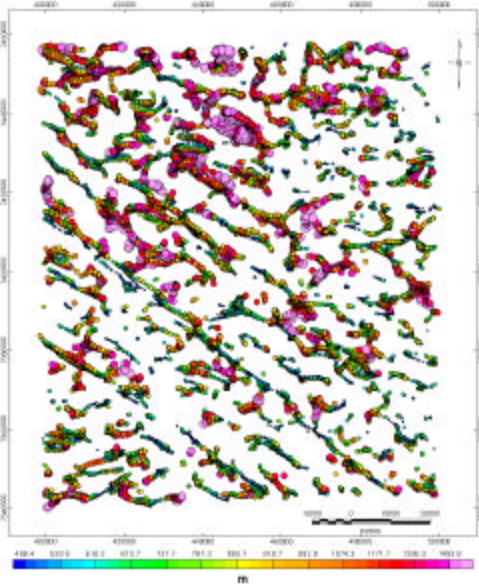


Figura 6 – Mapa de profundidades de fontes magnéticas.

Interpretação

O mapa do gradiente horizontal de ordem zero foi interpretado através do traçado das anomalias de máxima amplitude, as quais ocorrem associadas a qualquer variação do gradiente do campo magnético residual. Estas variações são máximas próximas as bordas das fontes magnéticas. Das estruturas mapeadas a partir do gradiente horizontal (Figura 8a), foram individualizados dois grupos principais, de direções NW-SE e NE-SW e, secundariamente, um outro conjunto de direção E-W.

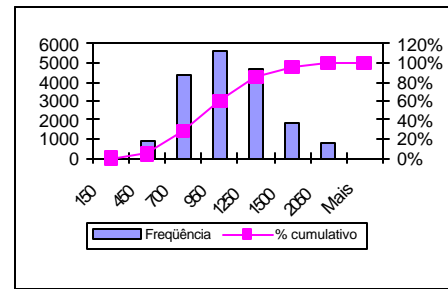


Figura 7 – Histograma da distribuição das profundidades.

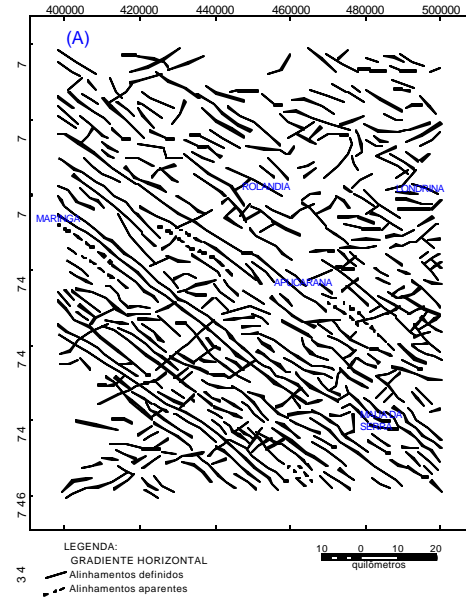


Figura 8a – Interpretação do gradiente horizontal.

A direção NW-SE é aquela que apresenta maior persistência em toda a área do estudo, com uma freqüência da ordem de três estruturas por quilômetro e extensão contínua máxima de 90 km para uma dada estrutura. A direção predominante é em torno de $N40^{\circ} - 60^{\circ}W$. As anomalias associadas a esta direção provavelmente estão delimitando zonas de diques e/ou falhas. Tais estruturas, porém, não apresentam grandes extensões magnéticas, pois normalmente estão segmentadas por outras de direção NW-SE, fazendo com que alcancem no máximo 25 km para uma única estrutura. A direção preferencial oscila entre $N45^{\circ} - 60^{\circ}E$.

As estruturas de direção EW ocorrem como faixas descontínuas e bastante espaçadas, normalmente nas porções mais a leste, e possuem extensões máximas de 15 km.

O mapa da fase do sinal analítico (Figura 8b), foi construído a partir dos alinhamentos de máximos e mínimos, os quais foram associados com a amplitude do mesmo sinal, para melhorar a interpretação deste último produto. As estruturas de fase apresentam direção predominante segundo $N45^{\circ} - 60^{\circ}W$ e, secundariamente, situam-se no intervalo $N45^{\circ}E - W$.

O mapa da amplitude do sinal analítico apresenta suas anomalias associadas diretamente com a posição da

fonte magnética. Dessa maneira foram traçadas as estruturas sobre os picos de máxima amplitude, a fim de localizar as fontes das anomalias. As estruturas assim obtidas (Figura 8c), foram sobrepostas ao mapa da fase do sinal analítico, onde foi realizado um refinamento da interpretação. Notou-se uma relação muito forte destes lineamentos com zonas de diques de diabásio, pois a amplitude do sinal analítico é uma medida da energia do sinal, a qual deve ser maior sobre estas fontes geológicas. Finalmente, a Figura 9 mostra os diagramas de roseta correspondes aos mapas de lineamentos do gradiente horizontal, da fase e da amplitude do sinal analítico.

domínio está relacionada com a quantidade de estruturas associadas a um mesmo *trend*. Neste mapa pode-se facilmente correlacionar as principais estruturas de direção NW-SE com os alinhamentos do Arco de Ponta Grossa (Figura 1), além do reconhecimento de outro, situado na região central desta megaestrutura, o qual intercepta em sua extremidade NW a cidade de Maringá, denominado neste trabalho de Alinhamento de Maringá. Os alinhamentos de direção NE-SW também aparecem no modelo gerado. Estes alinhamentos normalmente apresentam espessuras menores que os de direção NW-SE e são bastante descontínuos. A análise do modelo digital de elevação (Portela Filho, 2003), permitiu reconhecer que a direção N-S também apresenta grande importância na área, porém, ela não pôde ser contemplada pela interpretação geofísica em função de seu paralelismo às linhas de vôo, além da eliminação de muitos sinais decorrentes do micronivelamento. As principais tendências destes alinhamentos de direção N-S, obtidas através da interpretação do MDT, foram incorporadas ao arcabouço estrutural-magnético da área.

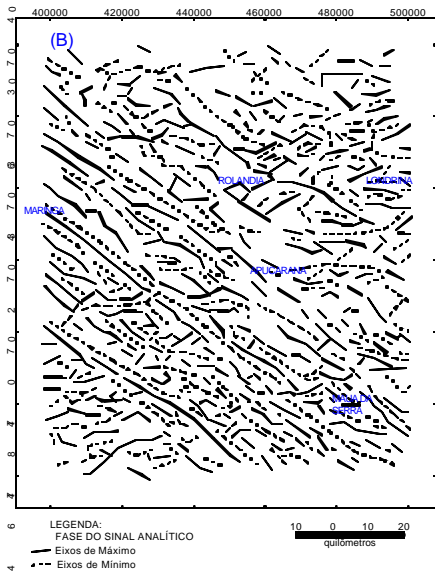


Figura 8b – Interpretação da fase do sinal analítico.

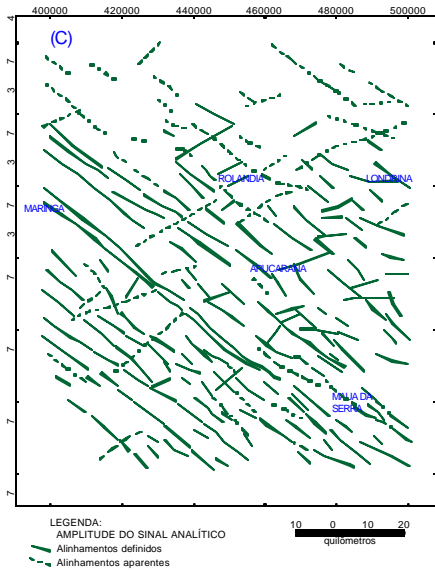


Figura 8c – Interpretação da amplitude do sinal analítico.

Arcabouço estrutural-magnético simplificado

Na tentativa de simplificar o arcabouço estrutural-magnético da área, foi produzido o mapa da Figura 10, reflexo das principais tendências e continuidades dos alinhamentos e diques, onde a espessura de cada

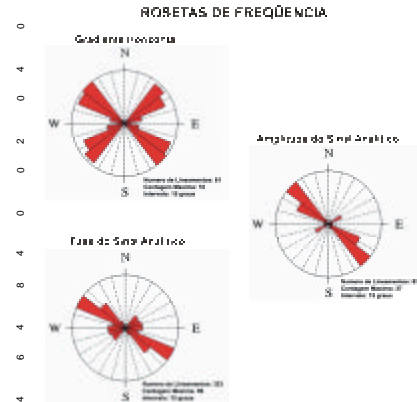


Figura 9 – Diagramas de roseta dos lineamentos.

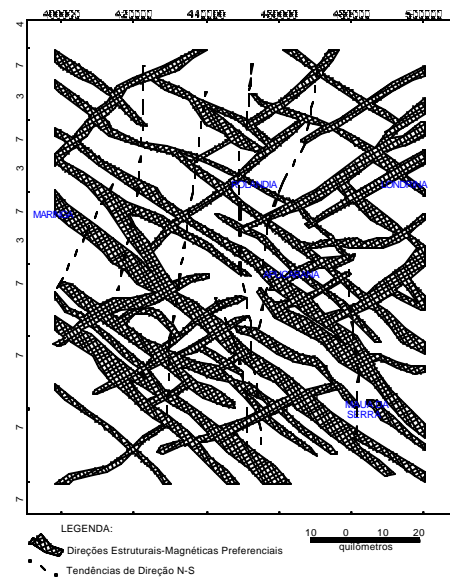


Figura 10 – Mapa estrutural-magnético simplificado.

Conclusões

A utilização de técnicas modernas de processamento de dados aeromagnéticos, como gradiente horizontal,

amplitude e fase do sinal analítico e deconvolução de Euler, em regiões fortemente magnetizadas, mostrou-se eficaz no delineamento do arcabouço estrutural-magnético da área e nas estimativas das profundidades das fontes da região central do Arco de Ponta Grossa.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobrás, a cessão dos dados aerogeofísicos e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa através de bolsa de mestrado.

Referências

- Almeida, F.F.M. de**, 1983, Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana: *Rev. Bras. Geociências*, **13(3)**:139-158.
- Almeida, T.I.R. de**, 1982, *O Arco de Ponta Grossa: uma proposta de configuração a partir da interpretação de dados de sensoriamento remoto*: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Dissertação de Mestrado, 108p.
- Barbosa, V.C.F., Silva, J.B.C., e Medeiros, W.E.**, 2000, Making Euler deconvolution applicable to small ground magnetic surveys: *Journal of Applied Geophysics*, **43**:55-68.
- Debeglia, N., e Corpel, J.** 1997, Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives: *Geophysics*, **62**:87-96.
- Ferreira, F.J.F., e Algarte, J.P.**, 1979, O comportamento aeromagnetométrico-cintilométrico das principais rochas alcalinas dos estados de São Paulo e Paraná: *SBG, Simp. Reg. Geol.*, 2, Rio Claro, *Atas*, (2):195-208.
- Ferreira, F.J.F., Moraes, R.A.V., Ferrari, M.P., e Viana, R.B.**, 1981, Contribuição ao estudo do Alinhamento Estrutural de Guapiara: *SBG, Simp. Reg. Geol.*, 3, Curitiba, *Atas*, (1):226-240.
- Ferreira, F.J.F.**, 1982, *Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução do Arco de Ponta Grossa*: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 169p.
- Geosoft**, 1994, *Griddepth: 3-D Euler deconvolution of potential data field*. Geosoft Inc., 29p.
- Geosoft**, 2001, *Microlevelling using Bi-directional Gridding*: Geosoft Technical Note, Geosoft Inc., 4p.
- Hsu, S.K., Sibuet, J.C., e Shyu, C.T.**, 1996, High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique: *Geophysics*, **61**:373-386.
- Hsu, S.K., Dorothée, C., Shyu, C.T.**, 1998, Depth to magnetic source using the generalized analytic signal: *Geophysics*, **63**:1947-1957.
- Marini, O.J., Fuck, R.A., Trein, E.**, 1967, Intrusivas básicas Jurássico-Cretáceas do Primeiro Planalto do Paraná: Geologia do Pré-Devoniano e intrusivas subseqüentes da porção oriental do estado do Paraná. J.J. Bigarella, R. Salamuni, V.M. Pinto (eds.). Boletim Paranaense de Geociências, 23 a 25.
- Milligan, P.R., e Gunn, P.J.**, 1997, Enhancement and presentation of airborne geophysical data: *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17(2)**:63-75.
- Minty, B.R.S.**, 1991, Simple micro-levelling for aeromagnetic data: *Exploration Geophysics*, **22**:591-592.
- 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, Towards a three-dimensional interpretation of potential field data via generalised Hilbert transforms: fundamental relations. *Geophysics*, **49**:780-786.
- Petrobrás**, 1981, Projeto Aerogeofísico Rio Ivaí: Consórcio CESP-IPT, Paulipetro (dados digitais).
- Portela Filho, C.V., Ferreira, F.J.F., Rosa Filho, E.F., Buchmann Filho, A.C., e Rostirolla, S.P.**, 2002, Estudo preliminar da conexão entre os aquíferos Serra Geral e Guarani com base em dados aeromagnetométricos e hidroquímicos: ABAS, *Cong. Bras. Águas Subter.*, 12, Florianópolis (CD-ROM).
- Portela Filho, C.V.**, 2003, *Caracterização geofísico-estrutural da região Londrina - Maringá (PR) e suas implicações para a exploração de águas subterrâneas*. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado (em andamento).
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J. e Somerton, I.W.**, 1990, Magnetic interpretations in three dimensions using Euler deconvolution: *Geophysics*, **55**: 80-91.
- Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot, M., e Perrin, M.**, 1992, The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary: *Science*, **258**:975-979.
- Roest, W.R., Verhoef, V., e Pilkington, M.**, 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics* **57**:116-125.
- Thompson, D.T.**, 1982, EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data: *Geophysics*, **47**:31-37.
- Thurston, J.B. e Smith, R. S.**, 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using SPI (TM) method. *Geophysics*, **62**:807-813.
- Turner, S., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, S., e Mantovani, M.M.S.**, 1994, Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **124**:333-348.