



Contribuição da aeromagnetometria e sensoriamento remoto na interpretação de lineamentos estruturais

Vanessa Madrucci *, Fabio Taioli, Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, Brasil.

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

This paper deals with the importance of airborne magnetic and remote sensing data integration for structural lineaments interpretation. It shows the pre-processing and processing steps applied in airborne magnetic data. These steps are used to eliminate noises (microllevelling) and for enhancement (analytic signal phase) of the magnetic data. This procedure allows a better geological interpretation. The interpretation was performed based on ETM+ Landsat 7 image and separately on the ETM+-analytic signal phase integrated image. These interpretations were compared and the integrated image showed very good result for geologic interpretation.

Introdução

Há décadas as imagens de satélite são utilizadas como produto base para a interpretação de lineamentos estruturais. O termo lineamento é definido, segundo O'Leary *et al.* (1976), como uma feição linear mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere distintamente dos padrões de feições que lhe são adjacentes, refletindo um fenômeno de subsuperfície. A identificação destas feições é de extrema importância em estudos geológicos, pois estes lineamentos representam zonas de fraqueza. Nestas zonas de fraqueza percolam fluidos, portanto estas podem estar relacionadas com ocorrência de água subterrânea em terreno cristalino, ocorrência de mineralizações, áreas de risco de escorregamentos, etc.

Porém existe um problema na utilização de imagens de satélite na fotointerpretação geológica, segundo Lowman *et al.* (1987) e Harris (1991), nas imagens de satélite existe uma atenuação das feições topográficas localizadas na direção de iluminação do sensor, com variação de mais ou menos 20^o. Como a imagem ETM+ foi adquirida sob condições de iluminação com fonte solar

de azimute 50^o, as feições estruturais que apresentam direção aproximadamente N50E ($\pm 20^{\circ}$) são atenuadas ou não identificadas. Além disso, como a imagem ETM+ é de data recente (2001), muitas vezes a interpretação de lineamentos pode ser prejudicada devido ao uso e ocupação do solo.

Para solucionar este problema pode-se utilizar imagens integradas com azimute de iluminação solar (sensores ópticos) ou azimute de imageamento (radar) diferentes, tais como TM-Radarsat ou Radarsat ascendente e descende, como realizado por Madrucci (2000), porém o custo é elevado. Este trabalho apresenta uma maneira de solucionar este problema: a integração digital da imagem óptica com dados aeromagnetométricos, obtendo-se num único produto as informações fornecidas pela imagem de satélite e pelos dados aerogeofísicos.

Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na região do Circuito das Águas do Estado de São Paulo (cidades de Amparo, Serra Negra, Lindóia, Águas de Lindóia, Socorro, Itapira) na porção leste do Estado de São Paulo e abrange aproximadamente 2000 km² de extensão. É constituída por rochas do embasamento cristalino cuja idade varia do Paleoproterozóico ao Neoproterozóico. A região sofreu uma evolução policíclica que modificou as rochas de origem através de metamorfismo, cisalhamento, migmatização e intrusões ígneas.

As rochas paleoproterozóicas, pertencentes ao Complexo Amparo, são gnaisses migmatítico e ortognaisses de composição tonalítica a granodiorítica e as pertencentes ao Complexo Itapira são paragnaisse e ortognaisses, quartzito, granitóide e anfíbolito. As rochas de idade neoproterozóica são representadas pelo Complexo Pinhal: migmatito granítico, gnaisses e intercalação de rochas metassedimentares; intrusões graníticas, granodioríticas e charnoquíticas com intercalações de xistos e gnaisses. Na área a estruturação é marcante na direção NE-SW, com a presença de anticlinais e sinclinais. Segundo Artur (1988), nesta região estão presentes as Faixas de Cisalhamento Pouso Alegre e Ouro Fino (de idade brasileira), ambas apresentam direção geral ENE-WSW e caráter transpressivo dextral (Figura 1).

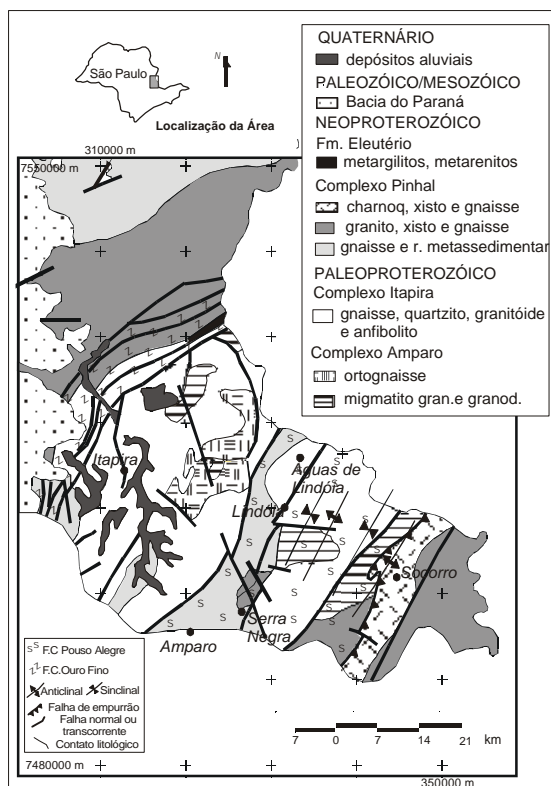


Figura 1 – Mapa geológico da área de estudo. Fonte: Artur (1988).

Materiais

a) Dados aerogeofísicos magnetométricos referentes ao Projeto Aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro, parte São Paulo, fornecidos pela CPRM. O levantamento aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro (subárea VI) foi executado entre 05/01/1979 e 25/02/1979, pela ENCAL SA e os dados foram corrigidos pela CPRM em 1988. No aerolevantamento foram utilizados uma aeronave Bandeirante e o magnetômetro Geometrics G-803. Os dados estão em formato ASCII x, y, z, onde x representa as coordenadas de longitude, y as de latitude e z os valores de campo total reduzido do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), valor magnético campo total nivelado, campo total corrigido da variação diurna, esses em nanoteslas (nT). A Tabela 1 apresenta as características do aerolevantamento

Tabela 1 - Características do aerolevantamento geofísico do projeto São Paulo-Rio de Janeiro (CPRM, 1995).

Direção das linhas de vôo	N-S
Espaçamento entre as linhas de vôo	1 km
Direção das linhas de controle	E-W
Espaçamento das linhas de controle	10 km
Intervalo entre as medições geofísicas sucessivas	100 m
Altura média do vôo sobre o terreno	150 m
Volume dos detectores	3072 pol ³
Canais	U, Th, K, CT e Mag

b) Imagens ETM+ (Enhanced *Thematic Mapper*) Landsat 7, em formato digital, referentes à órbita ponto: 219/75, data de passagem referente a agosto de 2001 (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e a banda pancromática), azimute solar 50°, elevação solar de 45° e resolução espacial de 30 metros nas bandas de 1 a 7 e 15 metros na banda pancromática, fornecidas gentilmente pelo acervo (CDteca) do INPE.

Métodos

Pré-processamento

Na imagem ETM+ foram realizadas correção atmosférica pelo método do Histograma Mínimo (Chavez Jr, 1975) e correção geométrica. As etapas de pré-processamento dos dados aerogeofísicos realizadas foram: conversão dos dados originais em grades regulares (250 metros); micronivelamento (Minty, 1991); geração das imagens magnetométricas campo total e fase do sinal analítico.

A dimensão das células (250 m) foi definida em função do espaçamento das linhas de vôo, representando 1/4 deste espaçamento, conforme sugerido por Vasconcellos *et al.* (1994). A escolha do método de interpolação bidirecional foi realizada em função da distribuição dos dados originais. O método bidirecional é indicado para interpolar rapidamente linhas de dados que estejam aproximadamente paralelas, pois tende a intensificar *trends* perpendiculares às direções das linhas do levantamento (Geosoft, 1995). Em dados aerogeofísicos os melhores resultados são alcançados quando a interpolação é feita por curvatura mínima, krigagem e bidirecional.

O micronivelamento é uma técnica utilizada para remover erros residuais de nivelamento de dados aerogeofísicos, por meio de filtragem direcional. Segundo Geosoft (2001), o micronivelamento pode ser definido como a filtragem de um banco de dados (em forma de grade) para reduzir ou remover efeitos não geológicos causados por ruídos de alto comprimento de onda, ao longo das linhas do aerolevantamento. Neste trabalho foi empregado o procedimento de "micronivelamento através de interpolação bidirecional de linhas" (Geosoft, 2001), Figuras 2a, 2b e 2c.

Processamento

A fase do sinal analítico é uma técnica utilizada para o realce de estruturas e discontinuidades que possuam alguma expressão magnética, sendo útil no mapeamento de estruturas geológicas. O sinal analítico é uma função complexa e a sua fase corresponde ao ângulo entre a parte real e a parte imaginária em cada ponto desta função, ou seja, entre a derivada vertical e o gradiente do campo magnético. A fase do sinal analítico não produz o grande número de estruturas apresentados nas imagens das derivadas, que nem sempre correspondem realmente às feições estruturais, e torna mais definidos os diversos domínios magnéticos (Fuck, 2000), Figuras 3a e 3b.

Na imagem ETM+ foi realizada a transformação por componentes principais (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7). Utilizou-se o primeiro componente principal (1CP), pois este realça as feições de relevo e drenagem da imagem. Escolheu-se a técnica IHS para a integração de dados

ETM+ e magnetometria (fase do sinal analítico). Esta técnica é a mais flexível e que apresenta o melhor desempenho para a combinação e integração de dados geológicos multifontes (Harris *et al.* 1994).

Resultados

Nota-se que na imagem magnetometria campo total bruto, aparecem alinhamentos magnéticos de direção N-S (Figura 2a), após o micronivelamento, essas feições desaparecem (Figura 2c). Essas feições N-S são causadas devido à direção das linhas de vôo. Como resultado final do micronivelamento obtém-se uma imagem livre de ruídos.

Em relação à imagem referente a fase do sinal analítico (Figuras 3a e 3b), observa-se que os alinhamentos magnéticos são bem realçados em relação à imagem magnetometria campo total.

Para comparação, realizou-se a interpretação observando-se as feições lineares de drenagem (preferencialmente) e de relevo fornecida somente pela imagem ETM+ e também pelo produto integrado ETM+-fase do sinal analítico. Neste produto, observou-se além das feições lineares de drenagem e de relevo fornecidas pela imagem ETM+, a resposta magnetométrica (valores positivos representados pela cor magenta) que indicam estruturas e descontinuidades com alguma expressão magnética. Utilizou-se a rede de drenagem digitalizada (1:50.000) para comparação com as feições de drenagem interpretadas no produto integrado. Os lineamentos estruturais foram obtidos a partir de interpretação em tela num SIG (Figuras 4a e 4b).

O produto integrado ETM+ e fase do sinal analítico possibilita análise conjunta desses dados, isto é, ele apresenta informações estruturais fornecidas pela fase do sinal analítico (representadas pelos matizes) e as informações texturais de relevo e drenagem fornecidas pela imagem ETM+.

Nota-se que alguns elementos lineares interpretados no produto integrado ETM+-fase do sinal analítico, algumas vezes não aparecem na imagem ETM+, principalmente em função da resposta da magnetometria. A seta branca indica lineamentos que são atenuados devido ao azimute de iluminação solar na imagem ETM+ e a seta vermelha indica lineamentos que não aparecem na imagem ETM+ devido à intensa ocupação.

Além disso, observa-se que alguns lineamentos que são fracamente identificados na imagem ETM+ aparecem bem marcados no produto integrado, devido à resposta magnetométrica.

A área mapeada por Artur (1988) como faixa de cisalhamento Ouro Fino e Pouso Alegre possui lineamentos bem marcados de direção NE-SW, evidenciados pelas altas respostas magnetométricas.

Conclusões

Ao se utilizar dados aerogeofísicos é de fundamental importância a etapa de pré-processamento dos dados, neste caso o micronivelamento, para a eliminação de ruídos de direção N-S na imagem, causadas pelas direções das linhas de vôo, aumentando a confiabilidade

para a utilização destes dados. A geração da fase do sinal analítico, como técnica de realce de estruturas foi bem sucedida auxiliando na fotointerpretação de lineamentos estruturais.

Sugere-se como base para a interpretação de lineamentos estruturais o produto integrado 1^o CP ETM+ - fase do sinal analítico. Os lineamentos estruturais interpretados a partir do produto integrado ETM+ (1^o CP) e magnetometria (fase do sinal analítico) são mais completos do que os interpretados somente na imagem ETM+. Isso ocorre devido à presença de intensa atividade antrópica que prejudica a fotointerpretação destas feições estruturais representadas pelos alinhamentos de drenagem e devido ao azimute de iluminação solar.

Referências

- Artur, A.C.** 1988. Evolução policíclica da infra-estrutura da porção sul do Estado de Minas Gerais e regiões adjacentes do Estado de São Paulo. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 231p.
- Chavez Jr., P. S.** 1975. Atmospheric, solar and MTF corrections for ERTS digital imagery. Phoenix: American Society Photogrammetry. p. 69-79.
- CPRM.** 1995. Catálogo geral de produtos e serviços. Geologia: Levantamentos aerogeofísicos, 2ed, 395 p.
- Fuck, R.F.** 2000. Interpretação de dados magnetométricos, eletromagnetométricos e gamaespectrométricos da região central da Serra dos Carajás, PA. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 185 p.
- GEOSOFT,** 1995. Geosoft mapping and processing system. Toronto, Geosoft Inc., 50p.
- GEOSOFT.** 2001. Geosoft technical note: microlevelling using bi-directional gridding. In: www.geosoft.com/news. Consulta realizada em abril de 2002.
- Harris, J. R.** 1991. Mapping of regional structure of eastern Nova Scotia using remotely sensed imagery: implications for regional tectonics and gold exploration. Canadian Journal of Remote Sensing 17:122-135.
- Harris, J. R., Bowie, C., Rencz, A. N., Graham, D.** 1994. Computer-enhancement techniques for the integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for the geosciences. Canadian Journal of Remote Sensing, 20:210-221.
- Lowman, P. D. Jr; Harris, J.; Masuoka, P. M; Singhroy, V. H; Slaney, V. R.** 1987. Shuttle Imaging radar (SIR-B) investigations of the Canadian shield: initial report. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 25:139-159.
- Madrucci, V.** 2000. Avaliação dos produtos integrados TM-Landsat, RADARSAT e gamaespectrométricos, na caracterização tectônica e mapeamento geológico de área mineralizada em ouro na região de Alta Floresta - MT. INPE, São José dos Campos, Dissertação de Mestrado, 187p.

Minty, B.R.S. 1991. Simple Micro-leveling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, 22:591-592.

O'Leary, D. W., Friedman, J. D., Pohn, H. A. 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87:1463-1469.

Vasconcellos, R. M.; Metello, M. J.; Motta, A.C.; Gomes, R. D. *Geofísica para levantamentos geológicos*. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 165 p.

Aradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de doutoramento (Processo 00/05740-2) concedida ao primeiro autor, à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Dr. Mario Metello, pela cessão de dados aerogeofísicos, ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Dr. José Carlos Neves Epiphanyo pela cessão da imagem ETM+-Landsat 7 e ao Instituto de Geociências – USP, pelo suporte acadêmico.

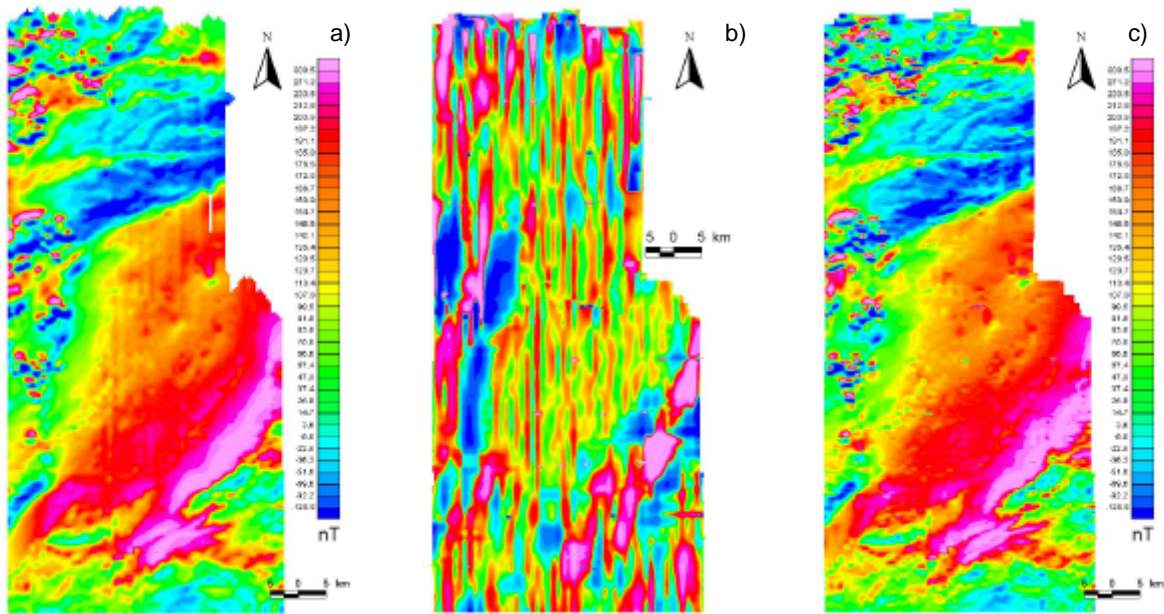


Figura 2a- Imagem magnetométrica campo total bruto, 2b- com erros de nivelamento, 2c- com micronivelamento.

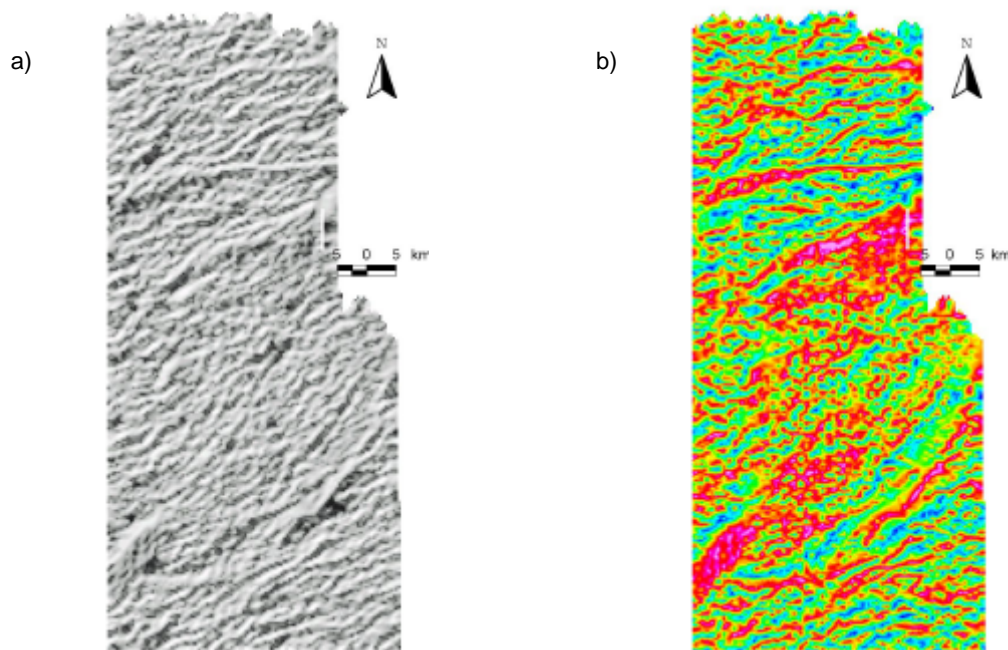


Figura 3a Imagem magnetométrica fase do sinal analítico (tons de cinza), 3b- fase do sinal analítico colorida (RGB).

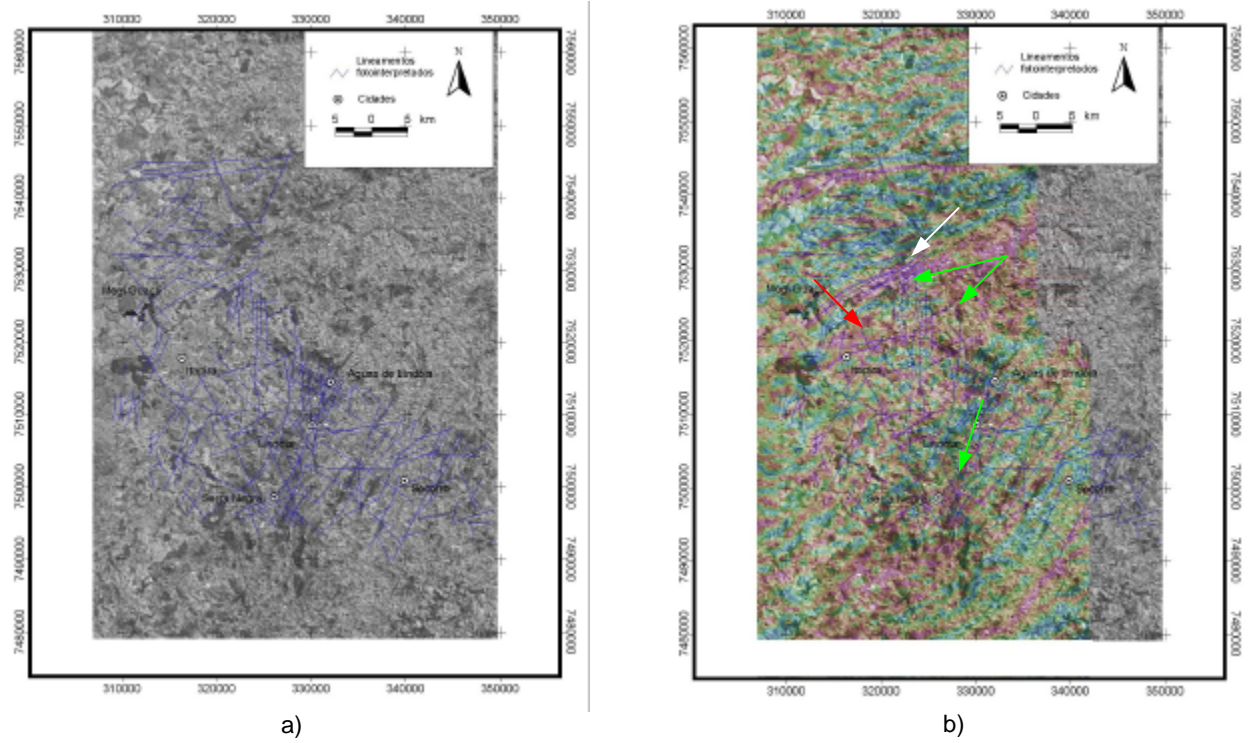


Fig. 4a – Imagem ETM+ (1CP) e lineamentos fotointerpretados, 4b – Produto integrado ETM+ (1CP) e fase do sinal analítico e lineamentos fotointerpretados.