

Integração de dados aerogeofísicos e do sensor ASTER no mapeamento geológico e seleção de alvos para prospeção mineral na região de Itapecerica, MG.

Érico Natal Pedro Zacchi ¹
Adalene Moreira Silva ²
Catarina Laboure Benfica Toledo ²
Daniele Beck Cardoso ¹
Carlos Roberto de Souza Filho ¹

¹ Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/IG
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
erico.zacchi@ige.unicamp.br
danile.cardoso@ige.unicamp.br
beto@ige.unicamp.br

² Universidade de Brasília – UnB/IG
Caixa Postal 04465 - 70910-900 - Brasília - DF, Brasil
adalene@unb.br
cattoledo@terra.com.br

Abstract. The southern portion of the São Francisco Craton (SFC), Minas Gerais, Brazil, including rocks ranging from the early Archean up to the late Neoproterozoic. However, the lack of rock exposures and connections among rock formations at surface poses problems for regional geologic mapping and interpretation. In this paper, an attempt was made to map three elliptical anomalies in the southernmost part of the SFC, using aerogeophysical (magnetics and gamma ray) data and remote sensing (ASTER sensor), with the aim to understanding both regional rock domains and structure.

Palavras-chave: remote sensing, airborne geophysical data, image processing, sensoriamento remoto, dados aerogeofísicos, processamento de imagens.

1. Introdução

A porção sul do Cráton São Francisco, escolhida para a este estudo, é ainda caracterizada pelo escasso conhecimento geológico. Essa situação se deve principalmente à cobertura de solos e ao intemperismo, que dificultam e oneram os trabalhos de mapeamento geológico básico através de meios tradicionais na região. Esse contexto impulsiona à busca e ao desenvolvimento de ferramentas que apresentem soluções menos onerosas e que demandem menor logística, sendo entretanto capazes de fornecer dados indiretos que auxiliem o mapeamento geológico. Neste contexto encaixam-se os levantamentos aerogeofísicos, como fonte de dados de diferentes origens (principalmente gamaespectrométricos e magnéticos), e os dados de sensoriamento remoto, com destaque para os provenientes de sensores multiespectrais, como o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer*). Diversos trabalhos tem sido realizados utilizando tanto dados aerogeofísicos (Silva *et al.*, 2003; Texeira, 2003), como imagens ASTER (Souza Filho *et al.* 2003) para o mapeamento de unidades geológicas e de minerais de alteração hidrotermal.

Estudos em desenvolvimento efetuados na região por Silva *et. al.* (2003) mostram que dados de levantamento aerogeofísico tem auxiliado tanto o conhecimento regional como fomentado atividades de exploração mineral fora dos limites do Quadrilátero Ferrífero. No caso específico do município de Itapecerica e arredores, os dados gamaespectrométricos destacam três estruturas elípticas ainda não individualizadas nos mapeamentos geológicos

tradicionais, com a ressalva que na porção interna de uma dessas estruturas encontra-se instalada uma das maiores minas de grafite do Brasil. Em função desse histórico, o mapeamento e entendimento desta estrutura geológica pode abrir novas perspectivas de exploração mineral na região. O objetivo deste trabalho é avaliar de forma comparativa e integrada a aplicação dos dados aerogeofísicos e do sensor ASTER para o mapeamento geológico e a seleção de alvos para prospecção mineral em terrenos intemperizados, com a perspectiva de limitações decorrentes de parâmetros ambientais.

2. Contexto Geológico

A região em que está localizada a área deste estudo pertence ao Cráton São Francisco Meridional, dentro do denominado Complexo Metamórfico Campo Belo. A porção Meridional do Cráton São Francisco (**Figura 1**) é composta por terrenos granito-gnáissicos arqueanos, sucessões do tipo *greenstone belt* arqueanas, rochas metasedimentares paleoproterozóicas, e coberturas sedimentares plataformais neoproterozóicas.

A maior parte da porção meridional do Cráton São Francisco é constituída por gnaisses e migmatitos de composição TTG, cujos protólitos se formaram entre 2,9 e 3,2 Ga, intrudidos por granitóides calcialcalinos com idades em torno de 2,78 Ga, e granitóides anorogênicos formados entre 2,7 e 2,6 Ga, além de intrusões máficas e máfico-ultramáficas (Teixeira *et al.*, 2000). Esses terrenos arqueanos foram divididos em vários complexos metamórficos, distribuídos no cráton meridional.

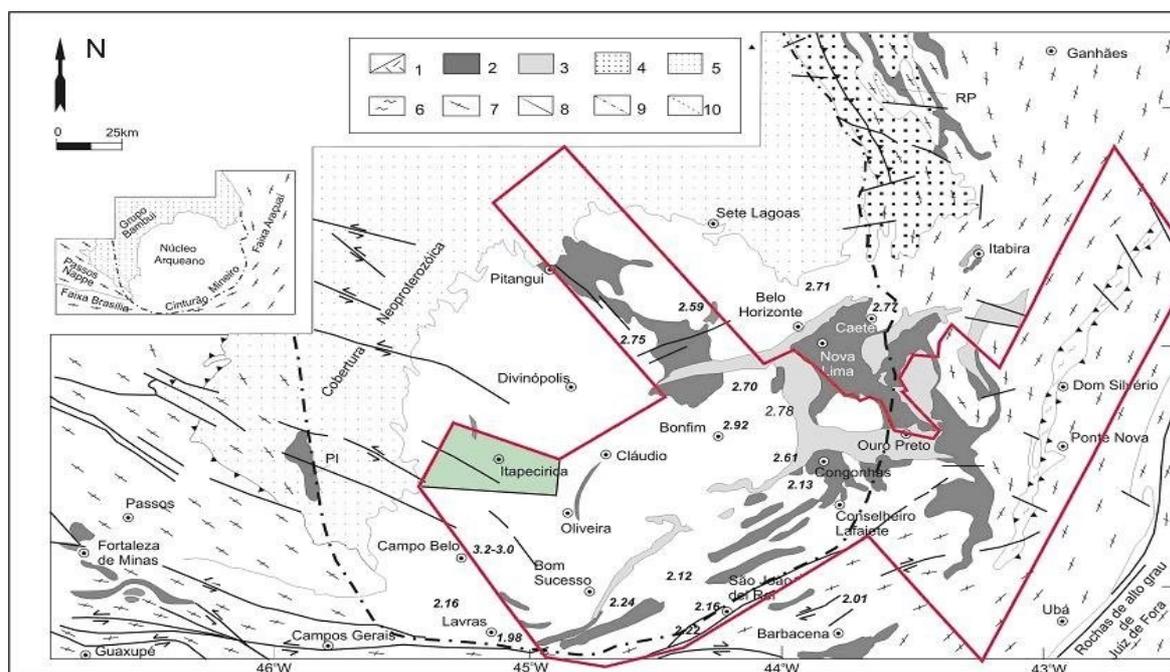


Figura 1 – Mapa Geológico esquemático da Porção Sul do Cráton São Francisco. Notar em verde a delimitação da área em estudo, bem como a área do levantamento aerogeofísico demarcada pelo polígono maior em vermelho (Modificado de Teixeira *et al.* 2000). 1 – rochas granitóides-gnaisses-migmatitos e granulitos, parcialmente retrabalhados no Paleoproterozóico (Arqueano); 2- *Greenstone Belts*; 3- Supergrupo Minas (Paleoproterozóico); 4- Supergrupo Espinhaço (Paleo a Mesoproterozóico); 5- Grupo Bambuí (Neoproterozóico); 6-Zona de Cisalhamento/Faixas cisalhadas; 7- Faixas marginais (Araçuaí, Sul da Faixa Brasília e Nappe de Passos), 8- Falhas Maiores; 9-Limite do Cráton; 10- Foliação Gnáissica. Siglas: PI, RP, FM, CO = Greenstone belts Piumhi, Rio Paraúna, Fortaleza de Minas e Congonhas; DS- Grupo Dom Silvério (Neoproterozóico).

O Complexo metamórfico Campo Belo corresponde à crosta siálica que aflora a oeste do Quadrilátero Ferrífero e do Complexo Metamórfico Bonfim, englobando nesta definição os

antigos complexos Divinópolis e Barbacena (Teixeira *et al.*, 1996). É constituído por rochas gnáissicas, anfíbolíticas e metaultramáficas, intrudidas por gabronoritos, granitóides e gabros. Localmente são encontrados relíctos supracrustais (Teixeira *et al.*, 2000), que podem corresponder às seqüências supracrustais arqueanas e/ou proterozóicas do Quadrilátero Ferrífero.

As rochas gnáissicas têm predominância no Complexo, e variam, petrograficamente de tonalito a granito. Os terrenos gnáissicos são divididos em função de sua composição e coloração. Ocorrências de anfíbolitos são comuns, e encontradas na forma de diques deformados, *boudins* e enclaves encaixados nos gnaisses, paralelos ao bandamento. Rochas metaultramáficas acamadadas (seqüência acamadada Ribeirão dos Motas) são amplamente distribuídas, e há ocorrência, de forma esparsa, de uma unidade quartzítica, composta por um granada-sillimanita-quartzito. Todo o conjunto encontra-se cortado por diques máficos gabronoríticos. Uma unidade granítica ocorre na forma de diques de variadas dimensões, ou como grandes corpos intrusivos (Fernandes & Carneiro, 2000).

Com relação ao metamorfismo a maioria das rochas do Complexo Campo Belo foi gerada ou submetida a condições metamórficas de fácies granulito, com exceção das rochas gabronoríticas, gabróicas e graníticas, que apresentam suas texturas ígneas originais preservadas e desenvolveu apenas paragêneses secundárias de fácies xisto verde (Fernandes & Carneiro, 2000).

No contexto do depósito, a grafita ocorre associada a xistos, com espessura variando de 0,5 metros a 20 metros, sendo a grafita classificada como tipo *flake* (Resende & Varela, 1997). Cada *flake* é individualizado, sendo cristalizado sob a forma de finas lamelas ou palhetas. Na base ocorrem quartzitos grosseiros, com lentes de xistos grafíticos, que denotam uma relação entre essas rochas. A unidade superior é composta xistos biotíticos espessos, bastante milonitizados, alterados para solos avermelhados pouco transportados.

3. Materiais e Métodos

3.1 Dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria)

A área de trabalho é coberta pelos dados do Projeto Pitangui - São João Del Rey -Ipatinga, recobrando toda a área do Quadrilátero Ferrífero e adjacências. A área do levantamento aerogeofísico encontra-se demarcada na **Figura 1** (polígono vermelho). Os métodos empregados neste levantamento foram o magnetométrico e o gamaespectrométrico, com sobrevôo a 100m de altitude segundo linhas espaçadas de 250 m, e linhas de controle a cada 2.500 m. A área coberta é de 36.385 km², equivalentes a 160.271 km lineares de vôo, com direções de linha de vôo de N30W e N30E e linhas de controle perpendiculares a estas (Lasa, 2001).

A partir do mapa do campo magnético anômalo foram derivados o de amplitude do sinal analítico – ASA (**Figura 2**), e três derivadas, uma vertical e duas horizontais (Dz, Dx e Dy). A combinação das duas últimas gerou o gradiente horizontal total (GHT). Optou-se por gerar mapas em pseudocor, com os baixos magnéticos em azul, enquanto os altos magnéticos foram representados em vermelho, realçando as estruturas e os domínios na área de estudo (Zacchi *et al.*, 2005).

No processamento dos dados gamaespectrométricos foram gerados mapas correspondentes aos canais de K, U, Th, e de contagem total. Da combinação dos três canais (K, U e Th) foram então obtidas composições ternárias RGB (**Figura 3**) e CMY, que possibilitam a definição de domínios gamaespectrométricos.

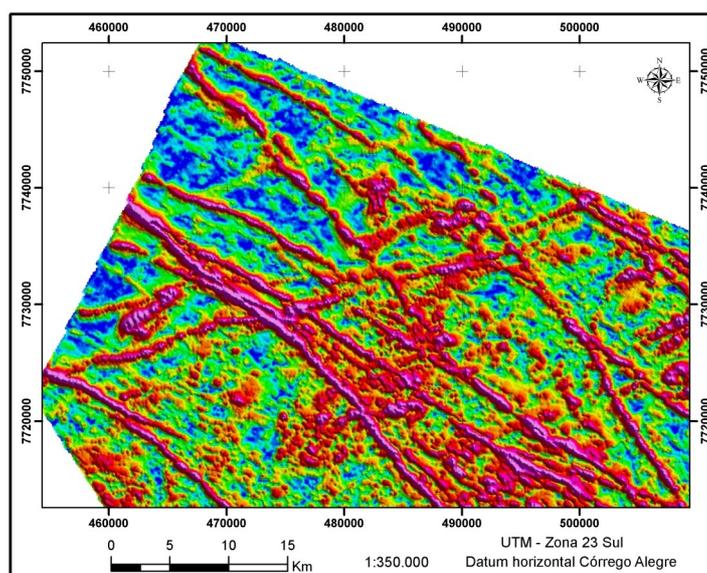


Figura 2 - Imagem da Amplitude do Sinal Analítico (ASA), onde se destacam os enxames de diques da região de Itapeçerica, MG. Imagem em pseudocor, os baixos valores em azul e os altos valores em magenta.

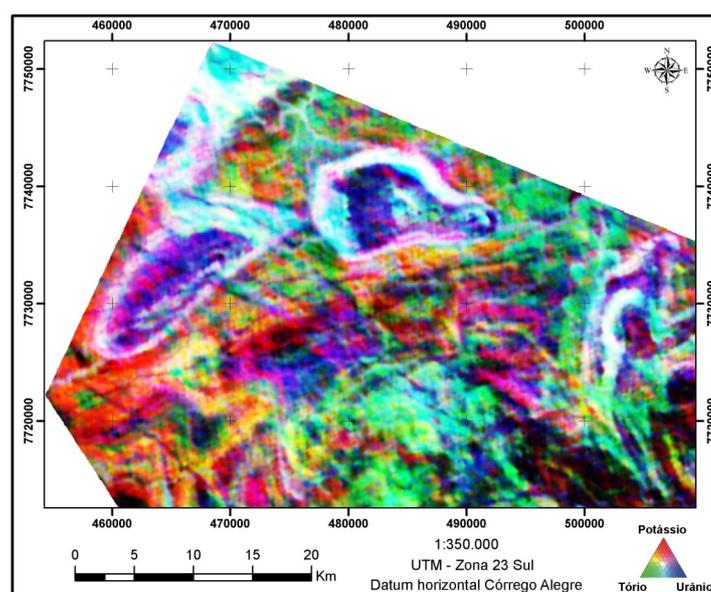


Figura 3 – Composição ternária RGB obtida a partir dos canais de radioelementos (K, Th e U), onde se destacam as anomalias elípticas em estudo.

3.2 Dados do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer*)

Lançado em dezembro de 1999 a bordo do satélite Terra, como parte do *Earth Observing System* (EOS) da NASA, o ASTER é constituído por três sub-sistemas de imageamento independentes: a região do espectro VIS e NIR é coberta com três bandas espectrais, na resolução espacial de 15 m; a região do espectro SWIR com seis bandas, na resolução de 30 m; e a região do espectro infravermelho termal (TIR) com cinco bandas, na resolução de 90 m (Souza Filho, C.R. 2003).

Entre as vantagens do sensor ASTER estão as seis bandas espectrais na região do infravermelho de ondas curtas. Essa configuração foi especificada para a caracterização de minerais presentes em solos e rochas, muitos dos quais considerados importantes para a exploração mineral e o mapeamento geológico (Souza Filho, C.R. 2003).

3.3 Análise por Principais Componentes (APC)

Entre as várias técnicas de mapeamento mineral com base em APC já propostas, destaca-se a PC Orientada por Feições/Técnica Crósta (Feature-Oriented Principal Component Selection (FPCS) – Crósta & Moore 1989, Loughlin, 1991). A técnica Feature-Oriented Principal Component Selection (FPCS) foi proposta para o realce espectral de óxidos/hidróxidos de ferro, a partir de dados TM, sendo todas as bandas submetidas à APC. Dessa forma a assinatura espectral dos minerais de interesse fica melhor caracterizada, separando-os de outros materiais superficiais, e posteriormente os coeficientes dos auto-vetores da imagem são comparados com a curva espectral dos de óxido/hidróxido de ferro. Como cada PC é a adição, ponderada pelo respectivo coeficiente da matriz de auto vetores das bandas originais do sensor, pode-se prever quais Pcs irão concentrar a informação espectral do alvo (Lima, V.S. 2003).

A técnica Crósta, proposta por Loughlin (1991), foi baseada na concepção da técnica FPCS, mas com o objetivo de mapear dois conjuntos de minerais associados, respectivamente argilo-minerais de alteração hidrotermal e óxidos/hidróxidos de ferro derivados do intemperismo de sulfetos. O autor propôs aplicar a APC não em todas as seis bandas, mas sobre dois conjuntos de bandas independentes, compostos cada por 4 bandas, que posteriormente tem a sua matriz de auto-vetores resultante analisada, determinando-se a contribuição individual de cada uma das quatro bandas para cada PC (Lima, V.S. 2003).

4. Resultados e Discussão

A estrutura elíptica onde encontra-se o município de Itapecerica, realçada através dos dados gamaespectrométricos, mostrou-se destacada em composições coloridas RGB, embora trate-se de uma área de grande presença de solos e cobertura vegetal, que constituem barreira intransponível à observação direta de litologias e jazimentos minerais. Entre as diversas combinações ternárias, foram selecionadas as composições RGB: 321 (**Figura 4a**), onde se destaca a cobertura vegetal (em vermelho); e a RGB:461 (**Figura 4b**), onde a tonalidade magenta deve-se à forte absorção na banda 6 (2,2 μm) decorrente da ligação Al-OH, presente nos minerais de argila. O amarelo pode ser interpretado devido à forte absorção na banda 1 (0.55 μm), em decorrência de transições eletrônicas do ferro na forma ferroso (Meneses & Netto, 2001).

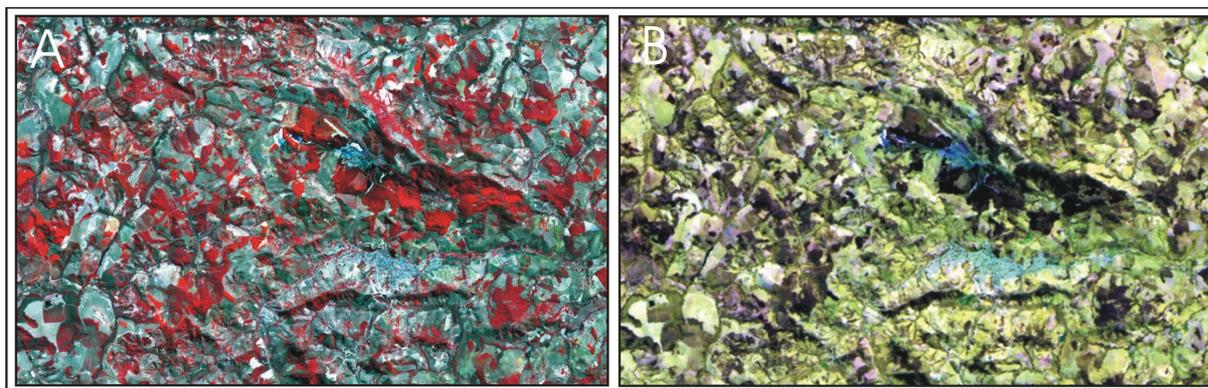


Figura 4 – Composições ternárias RGB para a estrutura de Itapecerica: (a) RGB321; (b) RGB461

Para a aplicação da Técnica Crósta, as bandas do sensor ASTER foram re-amostradas para a resolução espacial de 15 m, e foram selecionadas as combinações de 4 bandas apropriadas para a determinação de cada mineral de alteração proposto, analisando posteriormente as PCs que concentraram a informação espectral de interesse (**Figura 5**). Entre os minerais amostrados, deu-se prioridade aos argilo-minerais (caulinita (**Figura 5a**),

ilita (**Figura 5b**) e pirofilita (**Figura 5c**), e hidróxido de Fe (limonita – **Figura 5e**). O quartzo (**Figura 5f**) mostra-se particularmente interessante pelo fato de encontrar-se associado às ocorrências de grafita, sob a forma de quartzitos grosseiros, e que mostrou boa concentração na porção interior da estrutura.

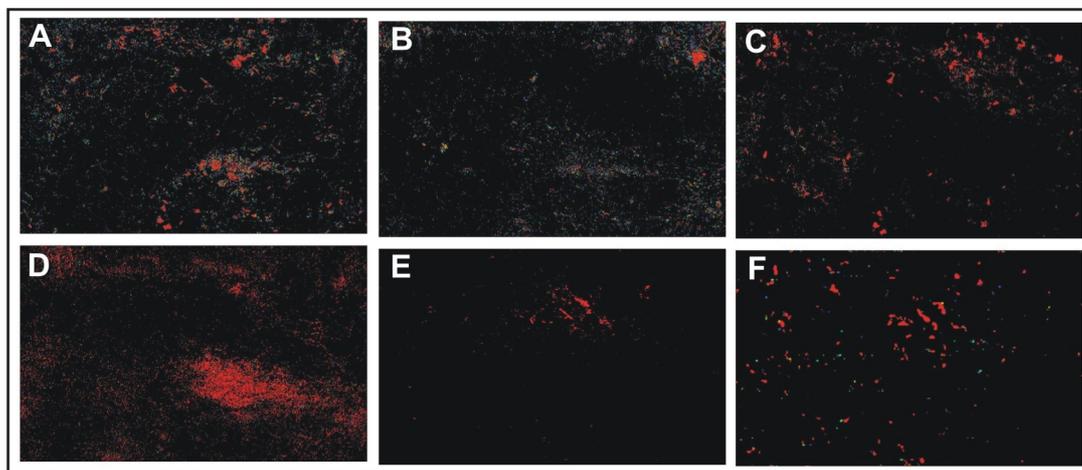


Figura 5 – PCs geradas para minerais de alteração mapeados na estrutura de Itapecerica: (a) caulinite; (b) ilita; (c) pirofilite; (d) calcite; (e) limonite; (f) quartzo.

A partir das PCs geradas, obteve-se uma composição ternária com os argilo-minerais para comparação com os dados gamaespectrométricos (**Figura 6**), que mostrou a concentração desses minerais ricos em alumínio e potássio, provavelmente provenientes da alteração de feldspatos, na borda da estrutura elíptica correspondente à anomalia de alta teor de radioelementos, caracterizada em campo como uma rocha de composição granítica. A concentração de limonite pode ser correlacionada à alteração de gabros do enxame de diques ressaltado pela magnetometria (**Figura 7**). Embora sua ocorrência tenha sido restrita a uma área relativamente pequena, e não esteja associada a todos os corpos de alta susceptibilidade magnética, é possível observar onde detectada um alinhamento NW-SE coincidente com o enxame de diques mapeado, com baixa susceptibilidade magnética, porém sempre associado a altos positivos.

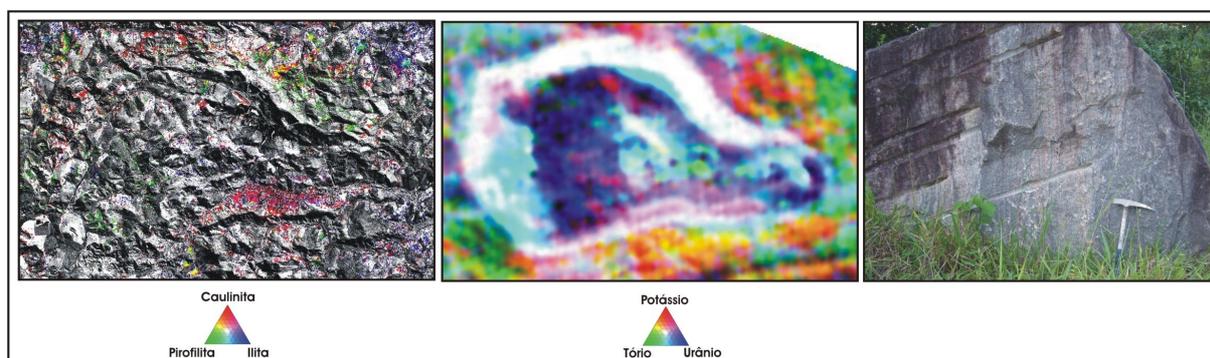


Figura 6 – Comparação entre a localização de argilo-minerais mapeados e a sua resposta gamaespectrométrica, assim como a sua feição em afloramento.

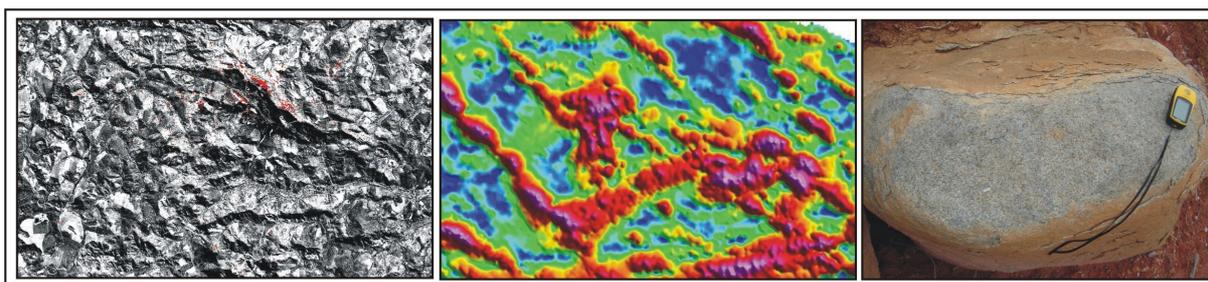


Figura 7 – Comparação entre a localização das ocorrências de limonita mapeadas, com os dados magnetométricos, onde destaca-se a ocorrência de diques gabróicos.

Esse mesmo procedimento foi empregado na tentativa de selecionar alvos de ocorrência de grafita, cuja assinatura espectral caracteriza-se pela baixa reflectância do espectro. As concentrações obtidas localizam-se predominantemente no interior da estrutura, associadas à mesma assinatura geofísica (alto U) cujo padrão repete-se na vizinhança, e tendo correlação com depósitos em processo de lavra (**Figura 8 e Figura 9**).

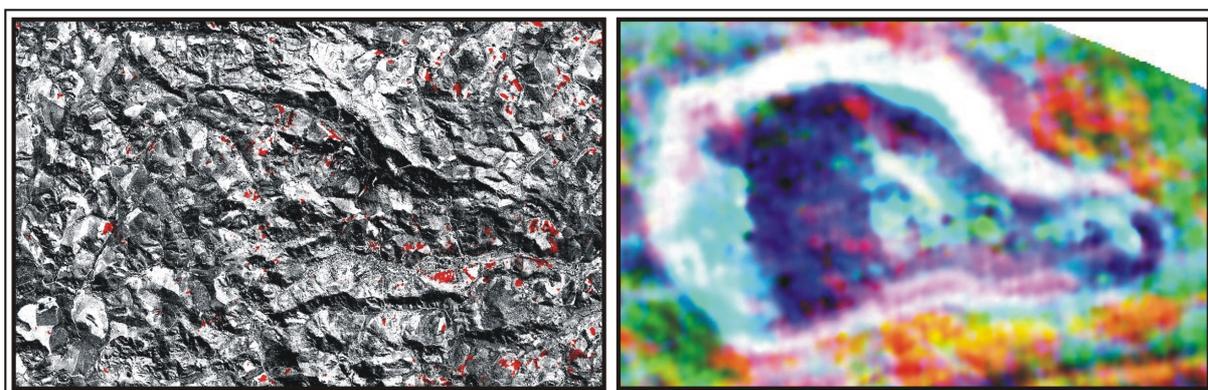


Figura 8 – Possíveis alvos de grafita, restritos ao interior da anomalia elíptica, e relacionáveis a uma assinatura gamaespectrométrica característica.

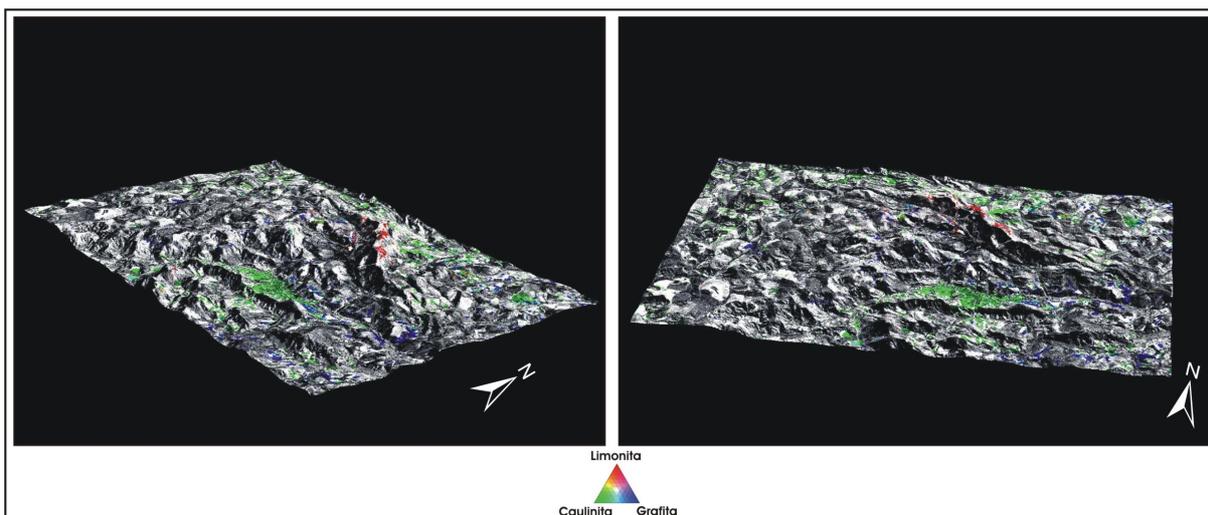


Figura 9 – Composição ternária elaborada a partir de PCs de minerais de interesse, sobreposta ao modelo digital de terreno, onde se destaca a estrutura elíptica de Itapeçerica, MG.

5. Conclusão

A proposta deste trabalho consiste em avaliar a eficiência dos dados do sensor ASTER para produzir informação geológica básica em terrenos intemperizados, uma vez que a sua

eficiência em terrenos áridos já foi comprovada em diversos trabalhos.

Dessa forma, conclui-se que a discriminação e o mapeamento dos minerais de alteração, assim como da grafita, foi coerente com o esperado, tendo como base a interpretação prévia dos dados aerogeofísicos e o conhecimento de campo. Convém ressaltar que a interpretação dos dados de sensoriamento remoto são facilitados pela disponibilidade dos dados aerogeofísicos, porém a utilização integrada, quando possível, mostra-se a mais indicada. Devido à ainda pequena área do território coberta por levantamentos geofísicos, a utilização de dados de sensoriamento remoto, frente a sua maior disponibilidade e aos bons resultados obtidos, mostra-se uma alternativa viável.

6. Referências Bibliográficas

- Crósta A.P. & Moore J. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. **In 7 Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology**, Calgary, Canada, Proceedings, 2: 1173-1187.
- Fernandes, R. A.; Carneiro, M. A.; 2000. O Complexo Metamórfico Campo Belo (Cráton São Francisco Meridional): unidades litodêmicas e evolução tectônica. **Revista Brasileira de Geociências**, 30, (4); 671-678.
- Lasa Engenharia e Prospecções S.A., 2001. **Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais, Área 2. Projeto Pitangui – São João Del Rey – Ipatinga. Volume I, Texto técnico.
- Lima, V. S. 2003. **Assinaturas espectrais de gossans associados à mineralizações de Pb-Zn-Ba na Bacia de Irecê (BA): um estudo de caso baseado em dados dos sensores TM e ASTER**. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. 154 p.
- Loughlin W.P. 1991. Principal Component analysis for alteration mapping. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. 57(9):1163-1169.
- Meneses, P. R. & Netto, J. S. M., 2001. **Sensoriamento remoto – reflectância dos alvos naturais**. Editora UnB. Brasília, DF. 264 p.
- Resende, E. F.; Varella, J. C. S., 1997. **Principais depósitos minerais do Brasil**. Vol. IV – Rochas e Minerais Industriais. Parte C. DNPM. Brasília. 185 p.
- Silva, A. M.; de Sousa Filho, C. R.; Toledo, C.L.B. & Dantas, E.L. 2003. Amalgamation of Different Crustal Blocks in Southernmost Part of the São Francisco Craton Constrained by Airborne Geophysical Data, Brazil. **Proceedings of the 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**.
- Souza Filho, C.R., 2003. ASTER à Vista. **InfoGe**, 29:62-64.
- Souza Filho, C.R., Tapia Calle C.H., Crósta, A.P., Xavier, R.P. 2003. Infrared Spectroscopy and ASTER imagery Analysis of Hydrothermal alteration Zones at the Quellaveco Porphyry-Copper deposit, Southern Peru. **In: Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2003**. Annual Conference, 1-12 (CD-ROM).
- Teixeira, A. A. 2003. **Integração de Dados Multifontes para Exploração de Ouro no Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**, UnB/ Instituto de Geociências, 157p.
- Teixeira N.A., Franke N.D., Brenner T.L., Marchetto C.;1996. Polymetallic sulfides and manganese deposits of Itumirim-Nazareno greenstone belt. An example of sub-seafloor geothermal system. **In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**, 39, Salvador, *Anais*:326-328.
- Teixeira, W.; Sabaté, P. ; Barbosa, J.; Noce, C. M. ; Carneiro, M. A.; 2000. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco craton, Brasil. **In: Tectonic Evolution of South America. 31 th International Geological Congress**, Rio de Janeiro. p. 101-137.
- Zacchi, E., Silva, A. M., Toledo, C. L. B., 2005. A expressão magnética e gamaespectrométrica das anomalias elípticas da região de Itapeçerica, MG. **In: Anais do Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society**; Salvador, Brasil.