

Integração de dados geofísicos e de sensores remotos aplicada ao mapeamento de óxido de ferro no Vale do Rio Curaçá, Bahia-Brasil

Neida Ilana Cardoso Rios ¹
Cândida Caroline Souza de Santana Leite ¹
Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha ¹
Ardemírio de Barros Silva ¹

¹ Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS
Programa de Pós Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente
CEP 44036-900 - Feira de Santana - Ba, Brasil
{rios.ilana, candidaleite.geo, francarocha, arde.barros}@gmail.com

Abstract. The Curaçá River Valley is economically important due to occurrences of mafic-ultramafic bodies containing copper sulphide mineralization. The mineralization consists of copper sulphides with predominance of chalcopyrite and bornite. The sulphides shows unusual characteristics, as the high percentage of iron oxides associated, therefore the mapping of iron oxides can help to identify new copper mineralization targets. The integration of geophysical and remote sensing data supports a geological knowledge by analysis of physical properties of rocks, being used as a tool for mining exploration. Band ratio were achieved on RapidEye imagery, allowing the recognition of iron oxides index and has been integrated with airborne geophysical data, as magnetometry and gamma-ray spectrometry. The integration proved to be an adequate alternative for mapping iron oxides and recognize mineralized areas.

Palavras-chave: image processing, geophysics, iron oxide index, cu deposits, processamento de imagens, geofísica, índice de óxido de ferro, depósitos de cobre

1. Introdução

O Vale do Rio Curaçá compõe uma estreita faixa de direção meridional, localizada no norte da Bahia e é considerada economicamente importante devido a mineralizações de sulfetos de cobre sob a forma de calcopirita e bornita hospedada em corpos máficos e ultramáficos. De acordo com Teixeira *et al* (2010), o conjunto dos corpos mineralizados constitui a Província Cuprífera do Vale do Rio Curaçá (PCVRC), que abrange uma área de cerca de 1700km² e engloba parcialmente os municípios de Juazeiro, Jaguarari e Curaçá.

Os principais corpos mineralizados a sulfetos de cobre são associados a piroxenitos, noritos e glimeritos da Mina Caraíba, explorada desde 1979. Com o passar dos anos, essa mina foi reduzindo sua produção, resultando na necessidade da descoberta de novas áreas para prospecção e exploração na PCVRC. Além dos corpos já explorados, existem outros prospectos de elevado potencial na área, a exemplo dos alvos Vermelhos (Teixeira *et al*, 2010).

Segundo Maier e Barnes (1996), o minério desta região apresenta características incomuns quando comparados à outros depósitos de cobre associados à rochas máfico ultramáficas. Dentre essas características, ressalta-se o elevado percentual de óxidos de ferro associado aos sulfetos de cobre nas mineralizações. Estudos realizados por Teixeira *et al* (2010) mostram que, em áreas tectono-controladas o percentual de magnetita equipara-se ao percentual de sulfetos de cobre e por vezes o supera. Além de magnetita, ocorrem outros óxidos de ferro relacionados aos sulfetos de cobre, a exemplo de ilmenita e hercinita.

Nesta perspectiva, o mapeamento de óxido de ferro pode auxiliar na identificação de novos alvos de exploração de cobre na região, uma vez constatada sua associação. Como demonstrado por Hoff (2002) a integração entre dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto produz melhores resultados na discriminação de litologias, sendo cada vez mais utilizada como ferramenta na prospecção mineral.

Sendo assim, este estudo tem como objetivo mapear áreas com valores anômalos de índice de óxidos de ferro em uma área da Província Cuprífera do Vale do Rio Curaçá, que podem estar

associadas à presença de cobre, utilizando a integração de dados geofísicos e de sensores remotos.

1.1 Caracterização da Área de Estudo

A região do Vale do Rio Curaçá apresenta um clima semiárido, com chuvas geralmente entre os meses do verão e uma média mensal de 450 mm de pluviosidade, além disso, a vegetação nativa é constituída majoritariamente por caatinga (Schistek e Martins, 2001).

A área de estudo (Figura 1) está localizada no município de Juazeiro próximo à divisa com o município de Curaçá. Esta abrange cerca de 120km² e inclui novos alvos de prospecção dentro da porção centro-oeste do Vale do Rio Curaçá, como os alvos Vermelhos e Siriema.

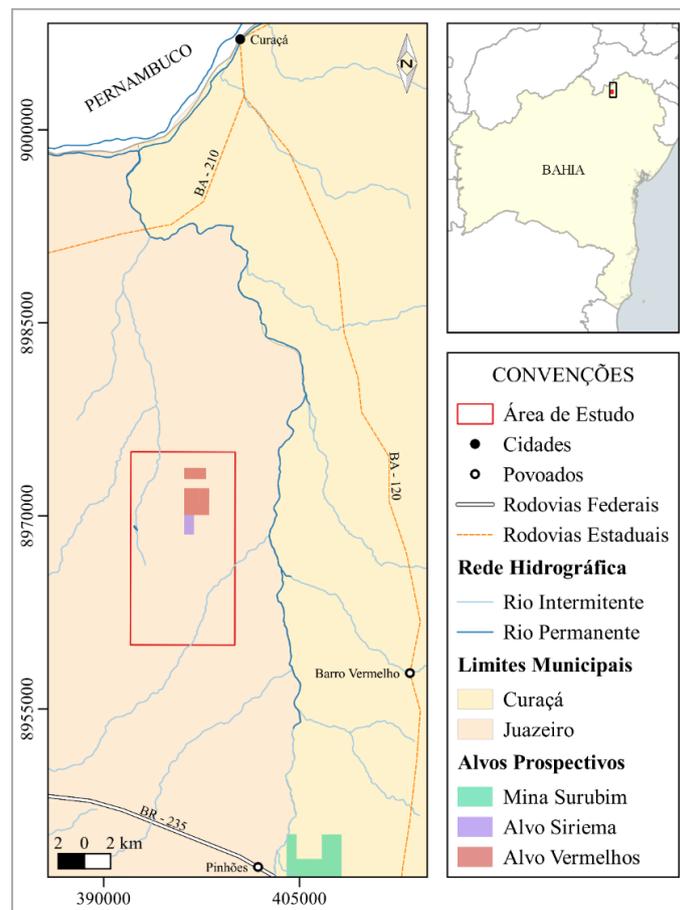


Figura 1. Localização da área de estudo (Fontes: DERBA, SIG-BA, Carafba Metais).

Teixeira *et al* (2010) compilou os principais trabalhos e apresentou novas pesquisas relativas a geologia do Vale do Rio Curaçá. Segundo os autores, nesta região o embasamento é tonalítico a quartzo monzodiorítico, com níveis gabróicos, sotopostos a uma sequência supracrustal. Além das rochas supracrustais ocorrem também intrusões sintectônicas de tonalito e granodiorito e intrusões tarditectônicas de sienogranito.

Os corpos máfico ultramáficos da região do alvo Vermelhos são compostos por cumulos ultramáficos e cumulos máficos, sendo o primeiro abundante em piroxenito e o segundo em norito, melanorito e gabro-norito (Teixeira *et al*, 2010). Esses autores afirmam que na área do alvo Vermelhos, o gabro-norito é um importante hospedeiro de mineralização de cobre. Este é constituído de hiperstênio, hornblenda, biotita e plagioclásio e contém como minerais acessórios a magnetita, apatita, zircão, ilmenita e pirrotita.

De forma genérica, ocorrem dois tipos de mineralizações na área: o minério disseminado e o minério em fraturas. O minério disseminado ocorre apenas nos piroxenitos, enquanto o minério em fraturas ocorre tanto nas rochas máfico ultramáficas quanto nas rochas cálcico silicáticas encaixantes. Os maiores teores de cobre ocorrem relacionados à presença de sulfetos em fraturas (Teixeira *et al.*, 2010).

Embora não caiba a esse trabalho discutir as hipóteses metalogenéticas da Província Cuprífera do Vale do Rio Curaçá, devido a seus estudos anteriores, Maier e Barnes (1999) consideram a possibilidade de o minério pertencer a associações do tipo IOCG ou OFCO (óxido de ferro-cobre-ouro).

2. Metodologia de Trabalho

Os dados e processamentos digitais em imagens de satélite deste estudo foram obtidos por Leite *et al.* (2016) enquanto os dados geofísicos integram o Projeto Aerogeofísico Riacho Seco/Andorinha da Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM). A análise dos dados foi realizada de forma integrada considerando as coordenadas de controle nos mapas produtos.

2.1 Campanha de Campo

Foi realizada uma campanha de campo para o reconhecimento da área e coletas de amostras de rochas em ocorrências minerais ao longo do prospecto Vermelhos. Foram coletadas sete amostras descritas macroscopicamente como norito e piroxenito.

2.2 Processamento dos Dados de Sensoriamento Remoto

No processamento efetuado por Leite *et al.* (2016) foram realizadas em laboratório medições espectrais em laboratório de amostras de rochas coletadas em campo, visando descrever as características espectrais das litologias hospedeiras do minério de cobre e foram utilizadas duas cenas mosaicadas do sensor RapidEye, com resolução espacial de 5m e data de passagem de 16/07/2013, para o cálculo do índice espectral de óxidos de ferro.

A análise do comportamento espectral dos minerais ricos em óxido de ferro das amostras orientou a aplicação de técnicas de realce no mosaico das cenas RapidEye, em virtude do conhecimento do padrão de reflectância na área de estudo.

Segundo Zacchi (2010) e Meneses e Almeida (2012), a razão de bandas é a técnica de realce mais utilizada em exploração mineral, pois realça os contrastes entre diferentes materiais na imagem através de bandas selecionadas de forma a cobrir máximos e mínimos de absorção do mineral de interesse.

2.3 Processamento dos Dados de Geofísica

Os métodos geofísicos empregados foram o magnetométrico e o gamaespectrométrico, em aerolevantamento a altura constante de 100m, segundo linhas de voo de direção E-W espaçadas em 250m e linhas de controle perpendiculares a cada 2500m. Para este trabalho, os dados foram interpolados, através do algoritmo *bi-directional line gridding* com tamanho de célula de interpolação de 50m.

A magnetometria e gamaespectrometria são métodos geofísicos bastante utilizados para o reconhecimento de áreas e feições geológicas para exploração de recursos minerais, estes métodos baseiam-se na análise de anomalias que correspondem à distribuição heterogênea de propriedades físicas no meio geológico.

Os produtos da magnetometria analisados foram o Campo Magnético Anômalo (CMA) e a Amplitude do Sinal Analítico (ASA), que se refere à susceptibilidade magnética das rochas com grande quantidade de minerais magnéticos, a exemplo dos óxidos de ferro como magnetita, ilmenita e a pirrotita.

Na gamaespectrometria foram obtidas as imagens dos canais individuais, potássio, equivalente de tório e equivalente de urânio (K, eTh e eU respectivamente) e a composição ternária RGB obtida a partir da combinação desses canais. Esses produtos auxiliam o mapeamento litológico e de de regolitos e contribuindo para o entendimento dos processos geomorfológicos de ambientes.

3. Resultados e Discussão

As medidas espectrais das amostras de rocha possibilitaram a análise do comportamento espectral e definição dos minerais essenciais nas principais rochas da área de estudo, constituindo uma relevante biblioteca espectral sobre a Província do Vale do Rio Curaçá, principalmente no alvo Vermelhos.

A Figura 2 mostra o comportamento espectral da amostra de norito, um importante hospedeiro de sulfeto de cobre no prospecto Vermelhos. Segundo Singer (1981), os óxidos de ferro possuem uma ampla absorção na região do visível e infravermelho próximo (380-1000 nm). O aumento da reflectância em aproximadamente 600nm na amostra, pode estar relacionada à ausência goethita, enquanto feições de absorção entre 850 a 900 nm associa-se à presença de hematita. Segundo Morris et al. (1985), a goethita possui principal absorção entre 630 e 710nm e a hematita entre 850 e 1000nm. Acrescente-se que o norito apresenta em sua composição grande quantidade de piroxênios, caracterizados pelas feições de absorção entre 1400 e 2350nm.

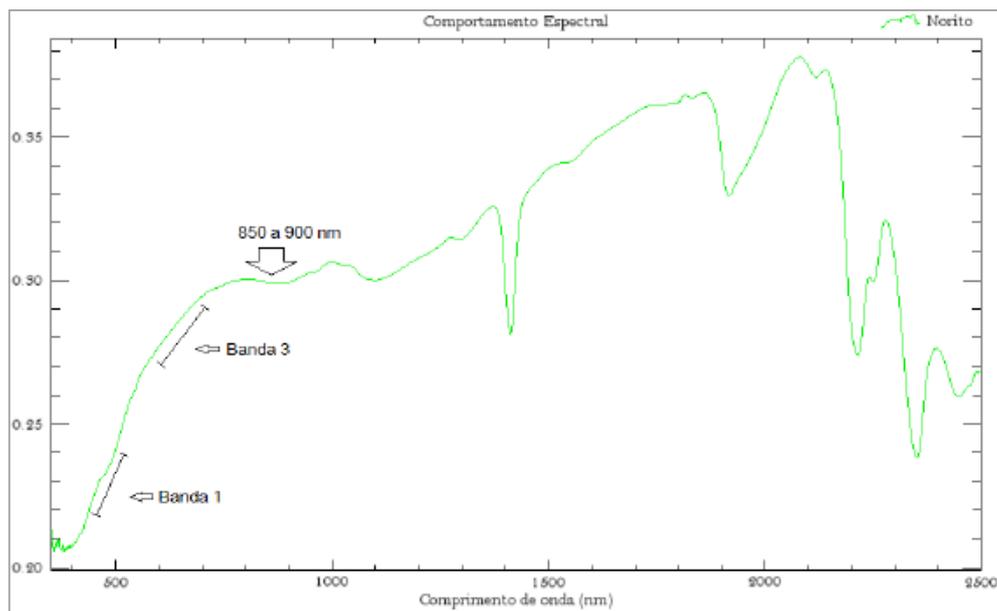


Figura 2. Comportamento espectral da amostra de norito coletada em campo.

O estudo do comportamento espectral possibilitou o reconhecimento das bandas a serem utilizadas na razão de bandas no mosaico das imagens RapidEye para mapeamento dos óxidos de ferro. Desta forma, foram utilizadas a razão das bandas 3 e 1, para obtenção do índice espectral de óxidos de ferro, considerando o pico máximo de reflectância em 610nm e o mínimo em 470nm respectivamente. O resultado alcançado pela razão de bandas é uma imagem-índice (Figura 3) correspondente ao realce das feições de interesse na área, onde os pixels com valores entre 0,91 e 1,20 indicam áreas com ocorrências de óxidos de ferro (Leite et al., 2016).

Pelo mapa-índice de óxido de ferro é possível distinguir algumas feições geológicas, dentre elas algumas caracterizadas como formações ferríferas, que no mapa-índice possuem baixos índices de óxidos de ferro, fato este pode estar relacionado com as bandas utilizadas. Também

em contraste, o alvo Vermelhos possui, na maior parte da sua área, baixos índices para óxidos de ferro, contudo a porção norte do alvo Vermelhos possui maiores valores-índice.

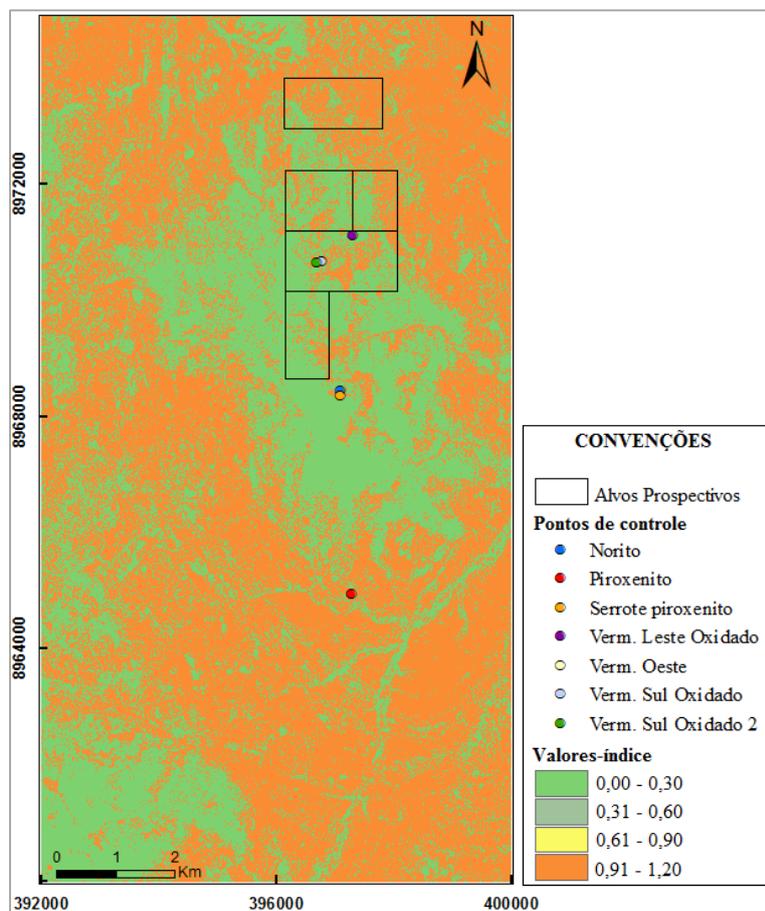


Figura 3. Mapa-índice para óxido de ferro na área de estudo a partir da razão das bandas 3-1 (Fonte: adaptado de Leite et al. 2016).

Segundo Meneses e Almeida (2012), o índice por si só pode não representar uma resposta direta devido à falseamentos ocasionados por vegetação, geometria do terreno e/ou intemperismo. Como exemplo, um ponto amostrado que apresenta no mapa índice valor menor que 0,9 corresponde a uma amostra de norito analisada e cujo comportamento espectral mostra picos de absorção característicos da presença de óxidos de ferro. Assim, a geofísica mostrou-se importante no auxílio ao mapeamento e interpretação do mapa índice de óxidos de ferro.

Os principais produtos da magnetometria foram o CMA e ASA (Figura 4). O CMA representa a heterogeneidade magnética do meio, podendo apresentar superposição de diversas fontes magnéticas de diferentes profundidades. A Amplitude do Sinal Analítico (ASA), desenvolvida por Nabighian (1972), representa uma medida da quantidade de magnetização, com pouca dependência da direção dos corpos e do campo terrestre, tornando-se uma importante ferramenta para mapeamento de corpos de alta susceptibilidade magnética.

Os mapas derivados da magnetometria demonstram distinções litológicas na área, discriminando feições que podem ser relacionadas ao mapa-índice, possivelmente devido à hematita, mineral que apresenta baixa susceptibilidade magnética. Nota-se uma alta susceptibilidade magnética em lineamentos estruturais, além de assinaturas geofísicas de direção NE-SW, que cortam o prospecto Vermelhos, relacionadas à falhas e fraturas. Observando as Figuras 3 e 4b percebe-se que áreas com altos índices de óxidos de ferro são correlacionáveis aos altos valores de susceptibilidade magnética da ASA. Contudo, assinaturas

geofísicas de direção NE-SW no alvo Vermelhos estão relacionados à baixos valores-índice de óxido de cobre, o que requer um estudo mais detalhado sobre o mascaramento de assinaturas nos dados. Além disso, todos pontos de amostras localizam-se em anomalias com altos valores de susceptibilidade magnética.

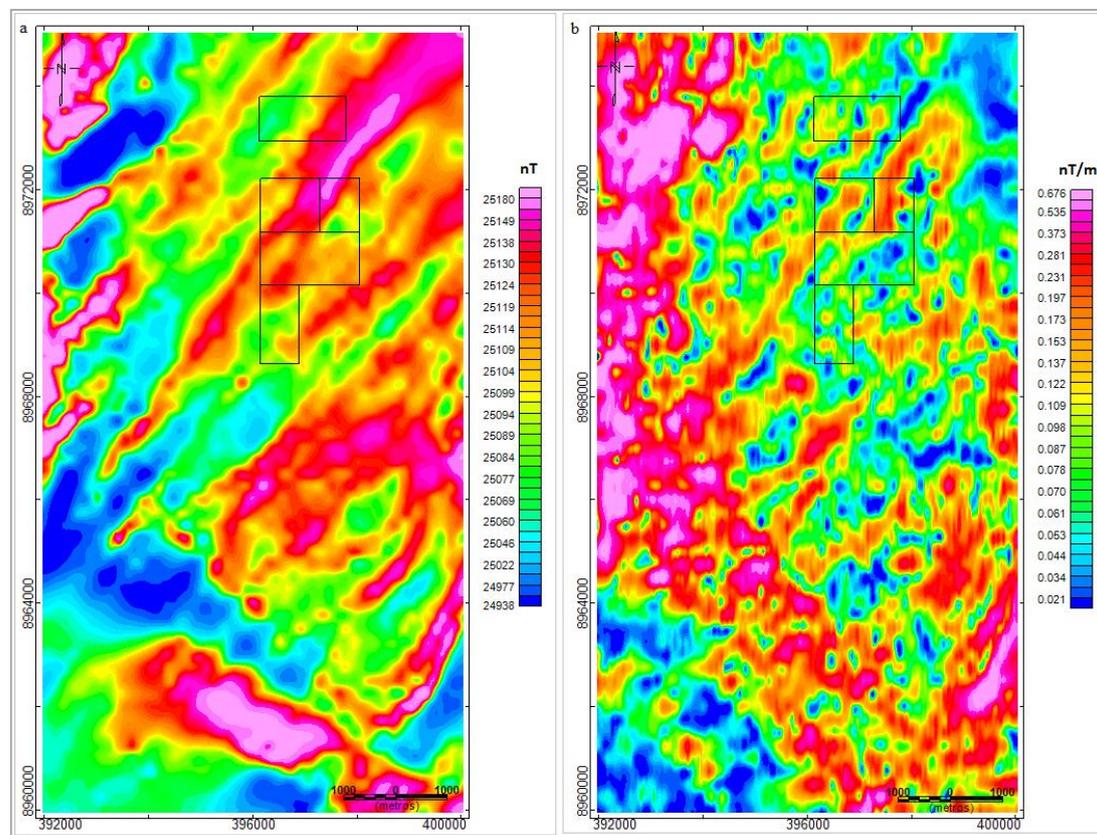


Figura 4. Produtos da magnetometria aérea (a. CMA e b. ASA)

Quanto à gamaespectrometria os produtos gerados foram os mapas de K (%), eTh (ppm), eU (ppm) e composição ternária (Figura 5). Segundo o IAEA (2003) o potássio, tório e urânio possuem uma abundância média na crosta superior de 2,3%, 12 ppm e 2,7 ppm respectivamente. Dickson e Scott (1997) relatam valores médios abaixo da abundância média da crosta terrestre para rochas máfico-ultramáficas, variando de 0,1 a 0,8% de potássio, 0 a 3,1ppm de tório e 0 a 1,1ppm de urânio.

Os mapas de K, eTh e eU (Figura 5a, 5b e 5c respectivamente) ajudam a compreensão dos possíveis processos intempéricos no local, que causam a remobilização de certos elementos por meio dos seus minerais. O mapa ternário (Figura 5d) enfatiza o enriquecimento de tório em áreas de menor valor-índice de óxidos de ferro, incluindo o alvo Vermelhos e o incremento de potássio em áreas caracterizadas com altos valores-índice de óxidos de ferro. Os pontos de amostras estão relacionados à baixa proporção dos elementos estudados, relativo à presença de corpos máfico ultramáficos. Notou-se ainda a possível presença de um corpo máfico a ultramáfico de grande extensão, na porção oeste da área de estudo, que não possui correlação com o mapa-índice de óxidos de ferro.

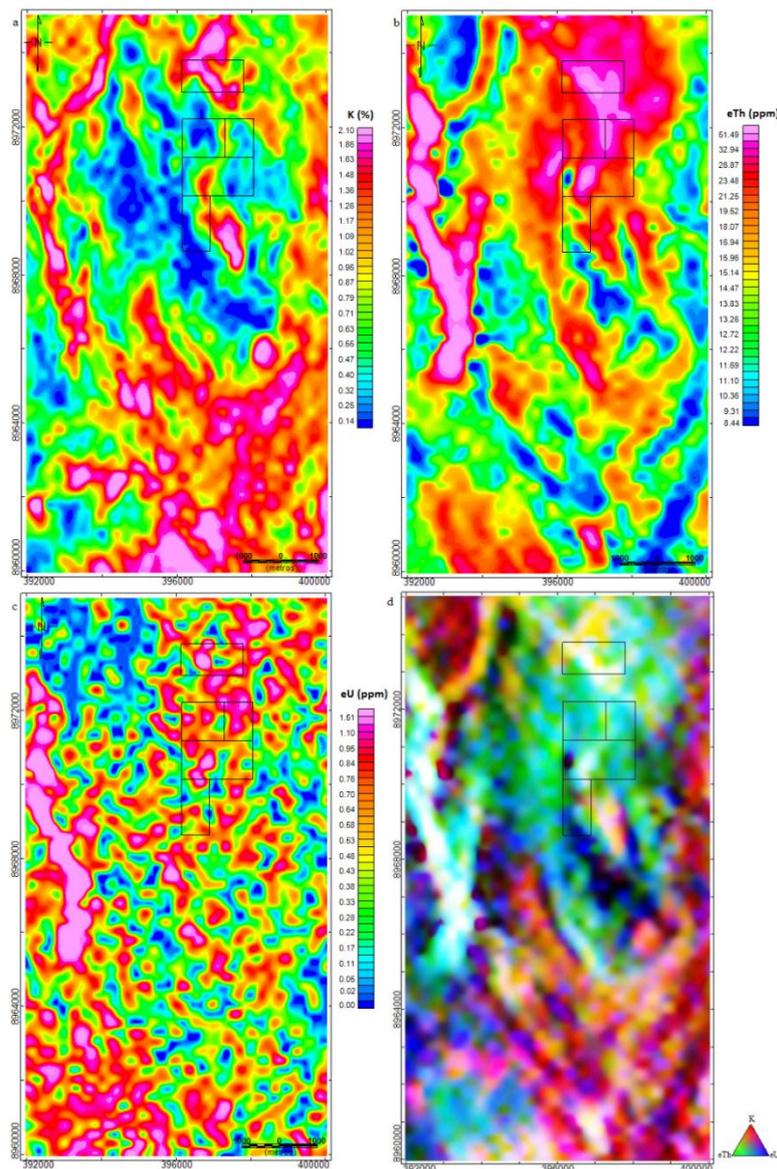


Figura 5. Mapas-produto da gamaespectrometria aérea (a.potássio, b.tório, c.urânio, d.ternário).

Conclusões

Os resultados obtidos com a análise integrada entre dados espectrais e geofísicos na área de estudo foram bastante satisfatórios, visto que o mapa-índice de óxidos de ferro correlaciona-se com a aerogeofísica e possibilita maior entendimento das mineralizações de cobre na região e servindo de auxílio para estudos posteriores de prospecção mineral. O estudo do comportamento espectral das amostras de campo viabilizou o reconhecimento das bandas na imagem RapidEye para o uso de técnicas de realce, como a razão de bandas, indicando áreas com ocorrência de óxidos de ferro por meio de um mapa-índice. Os mapas derivados da magnetometria demonstraram distinções litológicas por meio de propriedades magnéticas da rochas que podem relacionar-se aos óxidos de ferro. A gamaespectrometria ajudou na compreensão dos possíveis processos intempéricos, que causam a remobilização de certos elementos por meio dos seus minerais na área. A interpretação dos produtos foi dificultada devido à certo falseamento nos dados de processamento digital das imagens RapidEye, que pode ter sido causado por vegetação e/ou geometria do terreno, assim é necessário combinar a informação espacial dessas imagens com dados espectrais de outros sensores, em estudos posteriores, a fim de produzir outros índices, possibilitando melhorias na interpretação.

Agradecimentos

À Mineração Caraíba pelo apoio na campanha de campo para coletas de amostras, à UEFS, que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa através dos usos dos laboratórios de espectrorradiometria e de processamento de imagens georreferenciadas do Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, à UFBA e CBPM, pelo apoio obtido com o Projeto Mapa Metalogenético do Estado da Bahia II.

Referências Bibliográficas

CBPM. **Mapa geológico do estado da Bahia: escala 1:1.000.000**. Bahia: CBPM, 2p. 2003.

Dickson, B. I.; Scott, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys: adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, Canberra, v. 2, n. 17, p.187-209, 1997.

Hoff, R. **Integração de dados geológicos, de sensoriamento remoto, espectrorradiométricos e geofísicos aplicada à prospecção de depósitos filoneanos de fluorita hidrotermal no sudeste de Santa Catarina**. 2003. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências, Departamento de Geoquímica, Universidade Federal de Porto Alegre, Porto Alegre, 2002.

IAEA. **Guidelines for radioelement using gamma-ray spectrometry data**. Vienna: IAEA, 173 p. 2003.

Leite, C. C. S. S.; Silva, A. B.; Franca-Rocha, W. J. S. Utilização de razão de bandas para determinação de áreas com óxido de ferro na região do Vale do Curaçá (Prospecto Vermelhos) – Bahia. In: Simpósio Internacional SELPER 2016, 17, 2016, Puerto Iguazú. Disponível em andamento.

Maier, W. D.; Barnes, S. J. Unusually high concentrations of magnetite at Caraíba and others Cu-sulfide deposits in the Curaçá V. **The Canadian Mineralogist**. Toronto, p. 717-734. 1996.

Maier, W. D.; Barnes, S. J. The origin of Cu sulfide deposits in the Curaçá Valley, Bahia: evidence from Cu, Ni, Se, and Platinum-Group Element concentrations. **Economic Geology**, McLean, v. 94, n. 2, p.165-183, 1999.

Meneses, P. R.; Almeida, T. Aritmética de bandas. In: Meneses, P. R. e Almeida, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UNB, 2012. Capítulo 9, p. 143-147.

Morris R.V., Lauer H.V., Lawson C.A., Gibson E.K., Nace G.A., Stewart C. Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite (α -Fe₂O₃), maghemite (γ -Fe₂O₃), magnetite (Fe₃O₄), goethite (α -FeOOH) and lepidocrocite (γ -FeOOH). **Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets**, vol. 90, p. 3126-3144, 1985.

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

Shistek, H.; Martins, L. **A convivência com o semi-árido no município de Curaçá-Bahia**. Juazeiro: IRPAA/SEME/CDHIII. 2001.

Singer R.B. Near-infrared spectral reflectance of mineral mixtures – Systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides. **Journal of Geophysical Research**, vol. 86, p. 7967-7982, 1981.

Teixeira, J. B. G.; Silva, M. G.; Lindenmayer, Z. G.; D'el Rey Silva, L. J. H.; Vasconcelos, P. M.; Reis, C. H. C.; Andrade, J. B. F. Depósitos de cobre do vale do rio Curaçá, Bahia. In: BRITO, Reinaldo Santana Correia de; SILVA, Maria da Glória da; KUYUMJIAN, Raul Minas (Ed.). **Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo**. Brasília: CPRM, 2010. p. 73-94

Zacchi, E. N. P.; Silva, A. M.; Rolim, V. K. Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 28, p.643-656, 2010.