

Detecção de ocorrências de coberturas supergênicas a partir de imagens altimétricas e gamaespectrométricas: os alvos do extremo leste do Amazonas

Thais Andressa Carrino¹
Adalene Moreira Silva¹
Alexandre Augusto Cardoso da Silva²
Nilson Francisquini Botelho¹

¹ Universidade de Brasília - UnB
70910-900 - Brasília-DF, Brasil
thais.carrino@gmail.com; {adalene, nilsonfb}@unb.br

² Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobrás
CENPES – Rio de Janeiro-RJ, Brasil
alexandreaugusto@petrobras.com.br

Abstract. In tropical countries, as Brazil, deposits originated by supergenic enrichment are abundants, because the common and strong weathering related to smooth topography producing them. An area of the Amazon state (Brazil) was selected to the study of reconnaissance of the supergenic coverage (laterites and bauxites), through the use of airborne gamma-ray spectrometry and altimetric data. How exploratory guide, the following patterns were observed: low values of K (easily lixivied during the weathering) and of the K/eTh ratio; high values of eTh and altimetric data (plateau); high values of eU. Based on the individual and conjunct analysis of the geophysical and altimetric (SRTM) images, and 3D modeling, laterites and bauxites premapped by CPRM were identified visually, beyond the new occurrences. Additionally, this study applied a methodology to enhancement of supergenic targets using the classifier originally developed to the hyperspectral remote sensing, the Spectral Angle Mapper (SAM). The gamma-ray spectrometric and altimetric signatures related to the supergenic targets were extracted, serving as endmember in the application of SAM. The results produced with this classification showed similar targets with that observed visually. Additionally, the main precautions necessary to the application of this technique in geophysical and altimetric images were discussed, beyond the advantages of the use of this classification in the case study.

Palavras-chave: SRTM data, gamma-ray spectrometric data, Spectral Angle Mapper, supergenic target, dados SRTM, dados gamaespectrométricos, *Spectral Angle Mapper*, alvos supergênicos.

1. Introdução

Os estudos de solos e coberturas lateríticas em regiões tropicais úmidas compreendem ferramentas efetivas direcionadas à prospecção de depósitos minerais em subsuperfície ou mesmo em profundidade. Dentre tais estudos, destacam-se aqueles relacionados a depósitos lateríticos ou de enriquecimento supergênico referentes a jazimentos de ouro laterítico, bauxita, ferro, manganês, nióbio, níquel, caulim entre outros (Figueiredo, 2000).

O principal condicionante desses tipos de depósitos compreende a existência de intenso intemperismo químico, visto que a atuação mútua das chuvas com CO₂ e a geração de ácidos orgânicos em condições quentes e úmidas, atacam as rochas, propiciando reações como hidratação, oxidação, e com outros tipos de ácidos. Além do clima, as demais condições necessárias para a geração de depósitos supergênicos envolvem a presença de relevo suave, nível freático profundo e estabilidade tectônica, a fim de que os mesmos não sejam erodidos (Figueiredo, 2000; Biondi, 2003).

O solo laterítico consiste em uma mistura de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, óxido de manganês, e que são remanescentes da dissolução e lixiviação da sílica e outros óxidos, ocorrendo também, nesta situação, a redistribuição de metais no perfil de alteração. Bauxitas compreendem lateritas formadas por minerais de alumínio que, por vezes, concentram também gálio. Especificadamente, o termo bauxita é empregado a fim de referir-se a lateritas com 80-90% de Al₂O₃ (teores em base seca) (Biondi, 2003). As jazidas são

residuais e compreendem várias espécies de hidróxido de alumínio como boehmita e gibbsita, além de diásporos e impurezas (e.g., caulinita, nontronita, óxidos e hidróxidos de ferro). As variedades compreendem à pisolítica, oolítica, amorfa, esponjosa ou argilosa, ocorrendo comumente a bauxita *laterítica* (a partir de rochas alumino-silicáticas), além da bauxita *karst* (proveniente de rocha carbonática). No Brasil, jazidas de bauxitas, com idades terciária a recente ocorrem nas regiões amazônica, sul e sudeste, e foram originadas da atuação intempérica em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (Figueiredo, 2000).

Neste sentido, o objetivo deste artigo visa a detecção remota de coberturas supergênicas, em especial, as lateríticas e bauxitas do extremo leste do estado do Amazonas (Figura 1), a fim de mapear tais alvos utilizando-se imagens altimétricas e gamaespectrométricas, e discutir uma nova metodologia para o reconhecimento das mesmas.

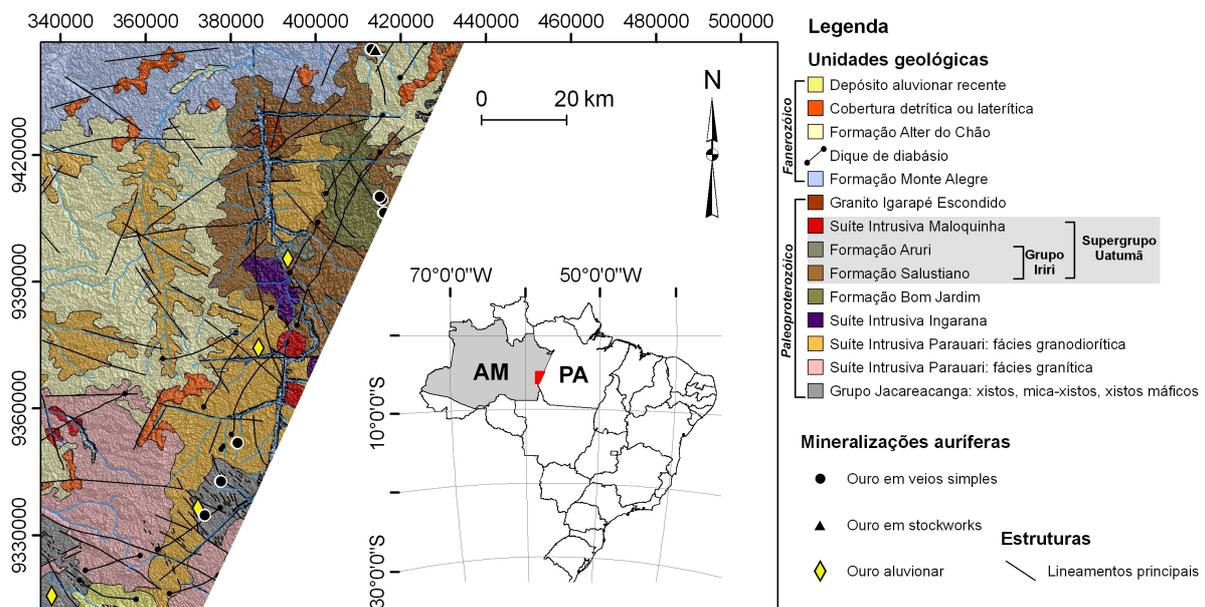


Figura 1. Localização da área de estudo e mapa geológico sobreposto ao modelo digital de elevação do SRTM (modificado de Klein et al., 2001).

2. Contexto geológico da área de estudo

A porção do extremo leste do Amazonas é caracterizada por terrenos paleoproterozóicos, como mostrado na Figura 1, e inclusos na Província Mineral do Tapajós. Estes terrenos são designados pelo Grupo Jacareacanga (2,1 Ga; rochas metassedimentares e metavulcânicas), as suítes intrusivas Parauari (~1,95 Ga; granitos porfiríticos), Ingarana (~1,8 Ga; rochas máficas) e Maloquinha (~1,8 Ga; granitos batolíticos com tendência anorogênica). Além destas unidades, destacam-se a Formação Bom Jardim (~1,8 Ga; vulcânicas intermediárias); o Grupo Iriti (~1,8 Ga), compartimentado nas formações Salustiano (vulcânicas ácidas) e Aruri (vulcanoclásticas). No mesoproterozóico destaca-se o Igarapé Escondido (granito tipo rapakivi), e no Fanerozóico incluem-se as seguintes unidades: Formação Monte Alegre (arenitos e folhelhos da Bacia Amazônica); o Diabásio Periquito (diques); e a Formação Alter do Chão (arenitos avermelhados, silicificados e ferruginizados) (Klein et al., 2001).

As unidades mais recentes equivalem a coberturas detrito-lateríticas e as aluviões. As coberturas detrito-lateríticas são comuns e cartografadas, sobretudo, por meio de imageamento remoto, consistindo em platôs escarpados de pequenas dimensões e alongados em geral. Esta unidade está sobreposta preferencialmente aos litotipos das formações Alter do Chão e Monte Alegre (cf., Figura 1) e compreendem os alvos focados neste artigo. Destaca-se que além de lateritas, empresa privada vem investigando a ocorrência de bauxita e possível

depósito em algumas porções desta unidade. Os depósitos aluvionares recentes são representados por areias inconsolidadas em trechos de rios (Klein et al., 2001).

3. Modelo para detecção de coberturas supergênicas com base em imagens gamaespectrométricas e altimétricas

Coberturas supergênicas, como lateritas e bauxitas, são produtos gerados pela forte atuação do intemperismo químico. Desta maneira, quando analisadas por meio da gamaespectrometria, são caracterizadas por quantidade de eU e/ou eTh maior que a média para as rochas crustais, além de baixa contribuição do K, uma vez que este elemento é pouco resistente ao intemperismo, sendo rapidamente lixiviado (Gunn et al., 1997). Medidas gamaespectrométricas de alvos supergênicos, especificadamente de bauxitas provenientes de várias localidades do planeta resultaram em conteúdos de eTh variando entre 5 a 131 ppm (média 49 ppm) e de eU entre 1,5 a 21 ppm (média de 11 ppm) (Isles e Rankin, 2000). Adicionalmente, os altos valores de eU e/ou eTh estão associados a maiores altitudes retratadas por típicos relevos suaves ou platôs que privilegiam maior intensidade intempérica para a formação de bauxitas e lateritas.

Nesse sentido, as imagens de K, eTh, eU e altimétricas foram selecionadas para a detecção remota de superfícies supergênicas no extremo leste do Amazonas. Os dados gamaespectrométricos são referentes àqueles de 1997 realizados para a CPRM, e inclusos no levantamento aéreo Bloco 1- Província Aurífera do Tapajós. A aquisição é caracterizada por altura de vôo de 100 m e espaçamentos das linhas de vôo (N-S) e de controle (E-W), respectivamente, de 1 km e 13 km. A imagem altimétrica compreende a do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), caracterizada por resolução espacial aproximada de 90 m, e coletada pelo ônibus espacial *Endeavour* no ano 2000.

4. Abordagem metodológica

4.1. Investigação de imagens altimétricas e gamaespectrométricas aéreas

A imagem do SRTM foi georreferenciada por meio do uso da folha topográfica Vila Mamãe Anã (1:250.000), utilizando-se 89 pontos de controle. A esta imagem, foi selecionada uma pseudo-cor e fez-se a sobreposição da unidade litoestratigráfica cobertura detrítica ou laterítica (cf., Figura 1). Este resultado está mostrado na Figura 2 (a), para averiguação da influência do relevo na disposição de alvos supergênicos.

Os dados aerogamaespectrométricos foram processados por Silva (2003) que empregou a interpolação curvatura mínima, determinando-se o tamanho da célula do *grid* em 250 m, e realizou o micronivelamento utilizando-se o algoritmo de Blum (1999). A interpolação dos dados permitiu a produção das imagens dos canais de K, eTh, eU, e da razão K/eTh. A partir destas, as assinaturas geofísicas das ocorrências de coberturas supergênicas pré-mapeadas pela CPRM foram analisadas, sobrepondo-se os domínios desta unidade litoestratigráfica nas imagens de eTh, da razão K/eTh e da composição ternária RGB (K:eTh:eU) com a quarta componente intensidade equivalendo ao SRTM processado por meio de filtragem direcional (Figura 2 (b, c, d)).

Das imagens da Figura 2, foram extraídos valores da concentração de radioelementos e altimétricos associados às abrangências da unidade cobertura detrítica ou laterítica (Klein et al., 2001; cf. Figura 1). Os valores foram os seguintes:

- K variando em torno de 0,346%;
- eTh variando entre cerca de 27,10 a 35,77 ppm (média de 31,43 ppm);
- eU variando em torno de 5,41 ppm;
- razão K/eTh com valores em torno de 0,01;

- altimetria relativa (SRTM), para os alvos situados ao sul, consistiram em valores entre 215 m e 250 m. No caso dos alvos localizados a norte, os valores altimétricos compreenderam a faixa de 180 m a aproximadamente 240 m.

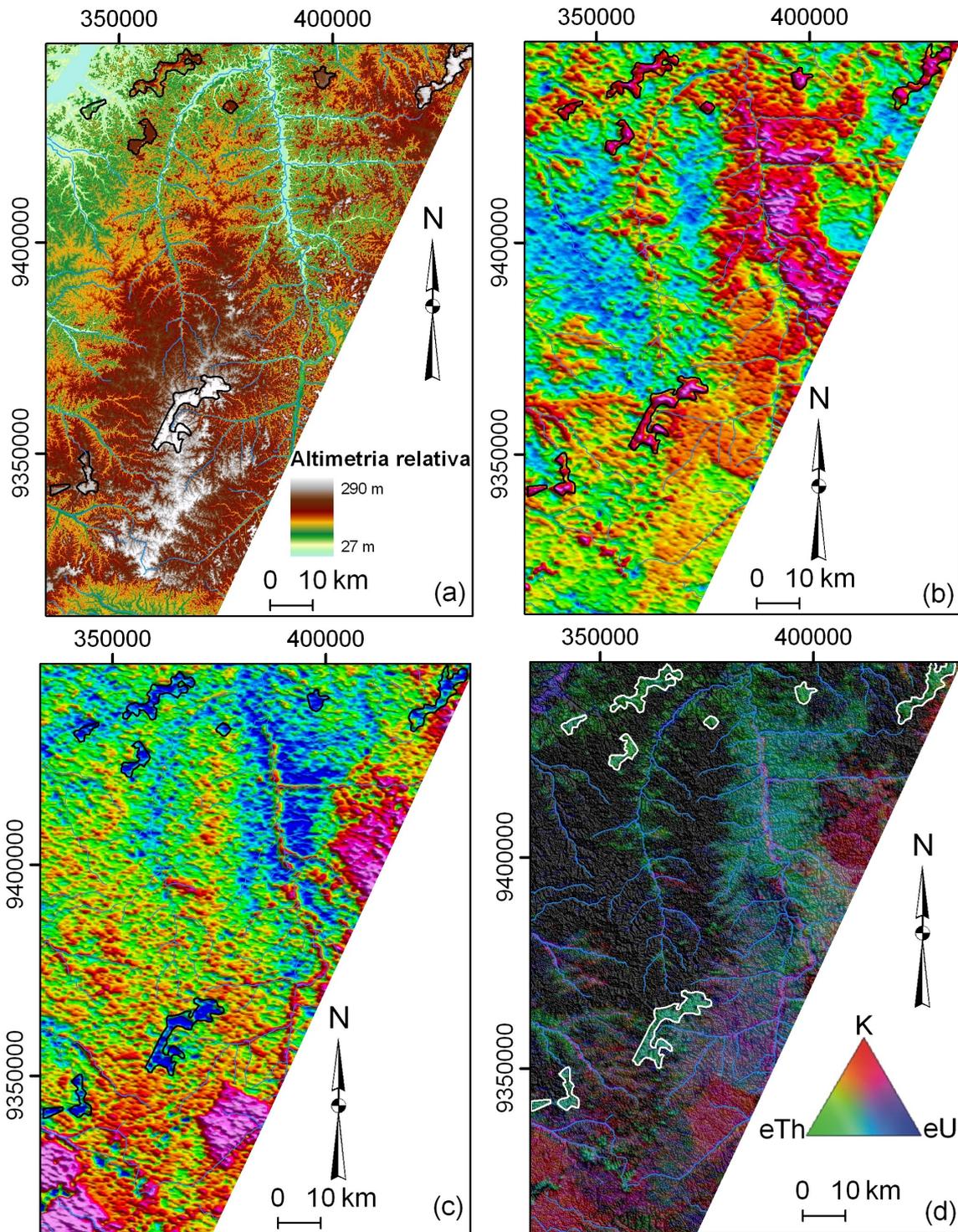


Figura 2. Imagens de altimetria (SRTM) (a), do canal do eTh (b), da razão K/eTh (c) e da composição ternária no sistema de cores RGB dos canais de K, eTh e eU, sobreposta ao modelo de elevação do SRTM filtrado (d). Os contornos indicam unidade litoestratigráfica já mapeada como cobertura supergênica (cf., Figura 1), caracterizada por altos valores altimétricos, de eTh, e baixos da razão K/eTh.

4.2. Modelagem de dados em perspectiva

As ocorrências de coberturas supergênicas foram avaliadas por meio da visão em perspectiva do modelo digital de elevação do SRTM, além da integração deste modelo com a imagem do eTh. A Figura 3 apresenta estes resultados para duas subáreas (a, b), indicando-se, por meio de setas, as ocorrências supergênicas para fins de comparação dos dois produtos

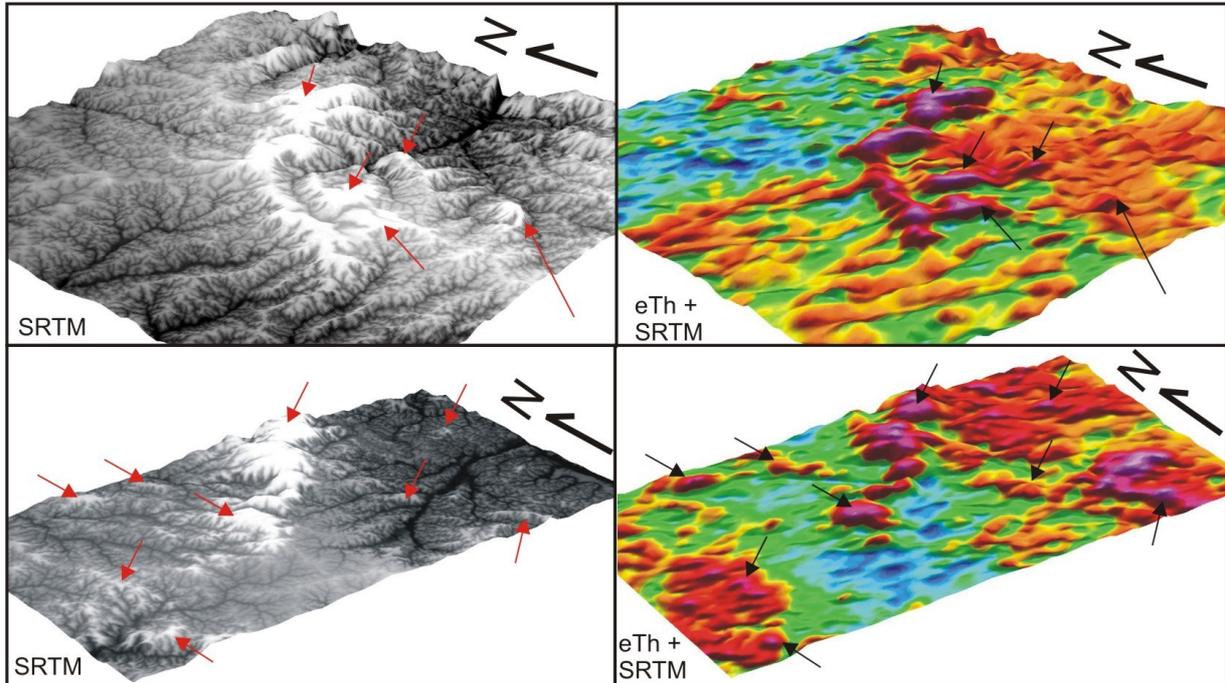


Figura 3. Visualização, em perspectiva, do modelo digital de elevação (SRTM) e da fusão deste modelo com a imagem do canal do eTh, em duas subáreas. Notar, pela indicação das setas, que áreas de platôs são caracterizadas por altos valores de eTh.

4.3. Realce de alvos supergênicos por meio de avaliação qualitativa e quantitativa

A análise dos produtos das Figuras 2 e 3 proporcionou o reconhecimento visual de ocorrências de alvos supergênicos pré-mapeados e outros inéditos, compatíveis com altos topográficos e de eTh, e baixos de K e da razão K/eTh. Este resultado qualitativo é mostrado na Figura 4 (a).

Com a finalidade de automatizar o reconhecimento de potenciais coberturas supergênicas, foi extraída a assinatura gamaespectrométrica e altimétrica de alvos pré-mapeados (Figura 4 (b)) a fim de utilizar-se para a aplicação da classificação supervisionada originalmente desenvolvida para o sensoriamento remoto hiperespectral denominada *Spectral Angle Mapper* (Kruse et al., 1993). Esta técnica já foi aplicada com sucesso em determinações de ocorrências minerais em trabalhos como os de Carrino et al. (2007), Miethke et al. (2007) e Zacchi et al. (2007), com base no uso de dados geofísicos aéreos.

Para o estudo de caso aqui abordado, as imagens de K, eTh, eU, da razão K/eTh e altimétricos (SRTM) foram selecionados e a assinatura típica de alvo supergênico da Figura 4 (b) foi assumida como *endmember* (dado de referência para uso de classificação supervisionada). Este *endmember* e os pixels das imagens de entrada são vetorizados e comparados por meio do ângulo espectral, assim denominado originalmente por Kruse et al. (1993), o qual deve ser escolhido como o menor valor possível para assegurar maior similaridade dos dados a serem realçados em relação ao dado de referência (Kruse et al., 1993). Com base na determinação do ângulo de 0,11 radianos, foram geradas as imagens da Figura 4 (c, d), que detalham os resultados em duas subáreas indicadas.

Em contrapartida, a aplicação do SAM considerando-se as imagens de entrada e o *endmember* sem o uso da imagem altimétrica do SRTM, produziu um resultado inferior aos anteriores, uma vez que mapeou parte de unidades graníticas (suítes intrusivas Parauari e Maloquinha) que não estão associadas a altos topográficos nem a respostas supergênicas. Este resultado está apresentado na Figura 4 (e).

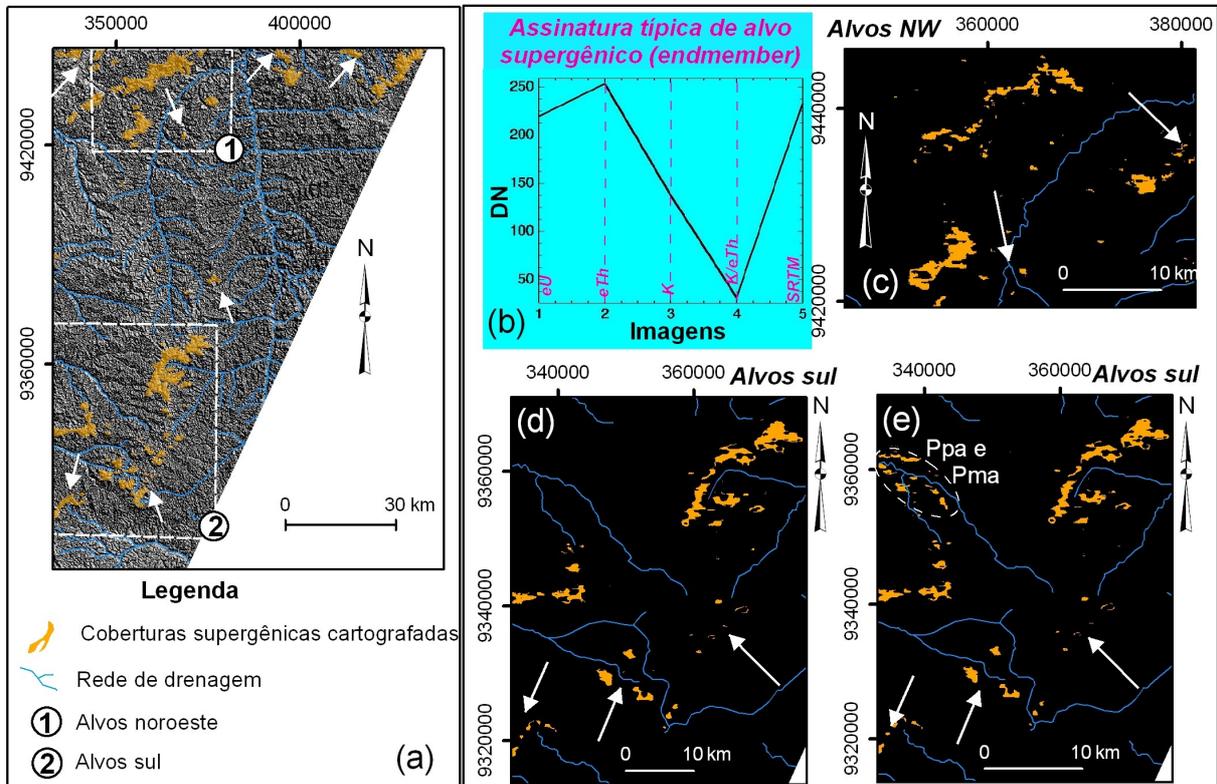


Figura 4. (a) Interpretação visual de coberturas supergênicas por meio das imagens de K, eTh, eU, K/eTh e altimetria (SRTM). (b) Assinatura de alvo supergênico: altos valores de eTh, da altimetria (SRTM) e de eU, baixo valor de K/eTh. (c) Exemplo da aplicação do SAM, com ênfase na porção NW da área de estudo, e na porção sul (d), com base no uso do *endmember* mostrado em (b). (d) Classificação de alvos supergênicos por meio da técnica SAM, não utilizando-se da altimetria. Neste caso, ocorreu a classificação de alvos graníticos que abrangem porções das suítes intrusivas Parauari (Ppa) e Maloquinha (Pma), de acordo com o mapa da Figura 1. Setas indicam novos alvos mapeados neste artigo.

5. Discussão dos resultados

Com base nas imagens gamaespectrométricas e altimétrica da Figura 2, foi possível verificar a forte correlação do relevo platô com altas concentrações de eTh e baixas de K. A sobreposição das ocorrências da unidade mapeada pela CPRM genericamente como laterítica nestas imagens facilita esta comparação visual. As assinaturas gamaespectrométricas médias destas ocorrências permitiram quantificar os valores baixos de K e da razão K/eTh em respectivamente, 0,346% e 0,01, além dos típicos altos valores de eTh (média de 31,43 ppm) e de eU (média de 5,41 ppm). Nota-se claramente que o teor de K está abaixo da média crustal (~2,5%), uma vez que é lixiviado no processo supergênico, enquanto há um aumento considerável das concentrações de Th e U, visto que suas médias crustais equivalem a 12 ppm e 3 ppm respectivamente. Tais valores radiométricos para lateritas (e bauxitas) aqui investigadas se enquadram ao observado em outras partes do mundo conforme exemplificado em Isles e Rankin (2000). No caso da altimetria, por ser resultante do SRTM que utiliza radar em banda X, o valor médio extraído é relativo e não absoluto. Este valor correspondeu a

intervalo em torno de 180 a 250 metros, comprovando a dependência destes alvos supergênicos a maiores altitudes desta porção da Província Mineral do Tapajós.

Seguindo o modelo teórico para a detecção das coberturas supergênicas, a modelagem tridimensional apresentada na Figura 3 validou e ilustrou ainda mais a dependência topográfica para a existência de alvos lateríticos ou mesmo para formação de bauxita.

A interpretação das Figuras 2 e 3 resultou na visualização e discriminação de novos alvos não mapeados em Klein et al. (2001), além de enfatizar aqueles previamente reconhecidos pela CPRM. Esta interpretação está consistentemente registrada na Figura 4 (a), cujas setas brancas indicam os novos alvos identificados neste artigo.

Os resultados da aplicação do SAM foram corroborados com os alvos já conhecidos pela CPRM, nas duas subáreas enfatizadas. Os novos alvos realçados (vide setas brancas na Figura 4 (c, d)) também foram consistentes com o produto qualitativo produzido neste artigo (Figura 4 (a)).

As assinaturas gamaespectrométricas e altimétrica apresentadas na Figura 4 (b) quantificaram as respostas típicas de alvos supergênicos, como interpretado qualitativamente observando-se as imagens interpoladas (e.g., Figuras 2 e 3). A dependência topográfica e dos elementos como K (baixo) e eTh (alto) por exemplo, foi avaliada com a aplicação do SAM somente com as imagens de entrada do K, eTh, eU e da razão K/eTh (Figura 4 (e)). Retirando-se a componente altimétrica, observou-se que a classificação não foi satisfatória quanto a anterior (e.g., Figura 4 (c, d)), uma vez que assinaturas gamaespectrométricas ambíguas a dos alvos supergênicos foram mapeadas erroneamente, a exemplo de fácies graníticas das suítes intrusivas Parauari (Ppa) e Maloquinha (Pma), mais ricas em eTh e caracterizadas por relevo mais arrasado. Isto mostra a importância do entendimento da gênese de lateritas e bauxitas, das respostas derivadas na gamaespectrometria e da influência da altimetria para a utilização de técnicas de classificação supervisionada ou mesmo pra a simples análise visual.

6. Conclusões

Esta pesquisa conseguiu determinar novos alvos supergênicos no contexto de ocorrências lateríticas e de bauxitas (mais recentemente investigadas) no extremo leste do estado do Amazonas, por meio da análise de imagens multifonte, tanto por investigação visual quanto pela aplicação inédita de metodologia de classificação supervisionada destes alvos.

Neste contexto, este trabalho utilizou, de maneira pioneira, a classificação SAM em dados de entrada consistindo em imagens gamaespectrométricas, adicionando-se também a altimetria (SRTM), com base no modelo teórico proposto inicialmente no artigo a fim da detecção de alvos supergênicos. O sucesso observado neste estudo de caso pode ser utilizado como guia prospectivo, sendo a metodologia passível de reprodução a quaisquer localidades visando-se a exploração de alvos como bauxitas, por exemplo.

Entretanto, cabe ressaltar algumas cautelas na aplicação da classificação SAM. Dentre estas, observa-se que o bom entendimento do contexto geológico ou prospectivo (bauxita) é necessário para estabelecer os limiares para a efetivação desta técnica. Nesta pesquisa, estes limiares são referentes à escolha subjetiva do ângulo espectral (Kruse et al., 1993), ou ângulo de similaridade entre o *endmember* e os pixels das imagens.

Dentre as vantagens proporcionadas pelo uso do SAM a imagens gamaespectrométricas e altimétricas, verifica-se a ausência da etapa de correção atmosférica, necessária a qualquer aplicação de classificação supervisionada em imagens de sensoriamento remoto multi e hiperespectral. Outras vantagens consistem no fato de que apesar da vegetação de grande porte e solos influenciarem, em parte, as respostas gamaespectrométricas, as imagens geofísicas aqui trabalhadas ainda revelaram grande parte da geologia. Ao contrário, com uso de imagens de sensoriamento remoto ($\lambda = 0,4 - 14 \mu\text{m}$) nesta área, a cobertura vegetal, solos e

constantes brumas e nuvens restringem totalmente o uso de classificações hiperespectrais para os mesmos fins abordados neste estudo.

Agradecimentos

Thais Andressa Carrino agradece à CAPES pela concessão de bolsa de mestrado e ao Laboratório de Geofísica Aplicada-UnB pelo suporte técnico. Agradecemos à CPRM-DIGEOF pela cessão dos dados aerogeofísicos.

Referências bibliográficas

Biondi, J.C. Sistema mineralizador laterítico (residual e/ou supergênico). In: J.C. Biondi. **Processos metalogênicos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003, cap. 6, p. 377-423.

Blum, M.L. **Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral**. 1999. 229 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 1999.

Carrino, T.A.; Souza Filho, C.R.; Leite, E.P. 2007. Aplicação de técnicas de classificação espectral a dados magnetométricos e gamaespectrométricos para mapeamento de áreas favoráveis a mineralização de EGP na região de Serra Leste, Província Mineral de Carajás (Pará). In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, 10., 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2007, em CD-ROM.

Figueiredo, B.R. Processos supergênicos. In: Figueiredo B.R. **Minérios e ambiente**. Campinas: Editora da Unicamp, 2000, cap. 16, p. 297-306.

Gunn, P.J.; Maidment, D.; Milligan, P.R. 1997. Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 1997, v. 17, n. 2, p. 175-185.

Isles, D.; Rankin, L. Geological **interpretation and exploration targeting from aeromagnetic data**. Workshop. Brasília: ADIMB.

Klein, E.L.; Almeida, M.E.; Vasquez, M.L.; Bahia, R.B.C.; Santos, M.L.E.; Ferreira, A.L. **Geologia e recursos minerais da Província Mineral do Tapajós. Folhas Vila Mamães Anã (SB.21-V-D), Jacareacanga (SB.21-Y-B), Caracol (SB.21-X-X), Vila Riozinho (SB.21-Z-A) e Rio Novo (SB.21-Z-C)**. Estados do Pará e Amazonas. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001, 81 p.

Kruse, F.A.; Lefkoff, A.B.; Boardman, J.B.; Heidebrecht, K.B.; Shapiro, A.T.; Barloon, P.J.; Goetz, A.F.H. The Spectral Image Processing Systems (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. **Remote Sensing of Environment**, 1993, v. 44, p. 145-163.

Miethke, C.; Souza Filho, C.R.; Silva, A.M. Assinatura geofísica e modelos prospectivos 'knowledge-driven' de mineralizações de Au no lineamento Congonhas, sul do Cráton São Francisco, MG. **Revista Brasileira de Geociências**, 2007, v. 37, n. 3, p. 490-503.

Silva, A.A.C. **Processamento, interpretação e integração de dados geológicos e geofísicos da Província Mineral do Tapajós**. 2003. 137 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF. 2003.

Zacchi, E.N.P.; Silva, A.M.; Rolim, V.K.; Portugal, R.S. Aplicação de técnicas de sensores remotos multiespectrais e hiperespectrais em dados aerogeofísicos visando a seleção de alvos para a prospecção de minério de ferro na Serra do Espinhaço Meridional, MG In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, 10., 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2007, em CD-ROM.