

## Realce de alvos supergênicos do leste do estado do Amazonas com base nas lógicas booleana e fuzzy

Thais Andressa Carrino (LGA-UnB), Adalene Moreira Silva (LGA-UnB), Nilson Francisquini Botelho (UnB), Alexandre Augusto Cardoso da Silva (PETROBRAS)

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent 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

In tropical countries, as Brazil, deposits originated by supergenic enrichment are abundant, 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 and K/eU ratio; high values of eTh and altimetric data (plateau); high values of eU. Based on these images, the boolean and fuzzy logics were applied to produce supergenic potential maps that were compared with premapped data.

### Introdução

Os estudos de solos e coberturas lateríticas em regiões tropicais úmidas consistem em ferramentas efetivas para a 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, 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 compreende uma mistura de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, óxido de manganês, 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.

Rochas lateríticas terciárias (lateritos maduros) e quaternárias (lateritos imaturos) estão amplamente presentes em toda a região amazônica, mas apenas os lateritos ferruginosos e bauxíticos constituem grandes corpos, como indicado na Figura 1. Rochas parentais de

diferentes idades e composições mineralógicas são fatores que explicam os distintos tipos de lateritos na região, dos quais destacam-se as bauxíticas, fosfáticas, ferruginosas, caoliníticas, magnesíferas e níquelíferas (Costa 1991). No caso de bauxitas lateríticas, as jazidas residuais compreendem várias espécies de hidróxido de alumínio como boehmita e gibbsita, além de diásporos. As variedades compreendem a pisolítica, oolítica, amorfa, esponjosa ou argilosa (Figueiredo, 2000).

O objetivo deste artigo visa a detecção de coberturas supergênicas, em especial, as lateríticas e bauxíticas do extremo leste do Amazonas (Figuras 1 e 2), a fim de mapear tais alvos por meio de imagens altimétricas e gamaespectrométricas, utilizando-se técnicas de modelagem de dados espaciais para o reconhecimento das mesmas.

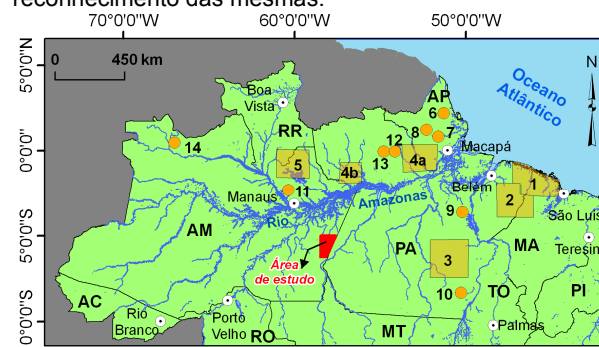


Figura 1. Corpos lateríticos principais encontrados na região amazônica: 1- Gurupi; Paragominas-Capim (grandes depósitos de lateritos bauxíticos e caulíníticos); 3 - Carajás (lateritos ferruginosos, bauxíticos, manganésíferos); 4 - Baixo Amazonas (a- Almerim, Monte Dourado, Felipe - lateritos bauxíticos e caulíníticos; b- Trombetas, Nhamundá e Faro - lateritos bauxíticos); 5 - Pitinga (lateritos bauxíticos e com resistatos de Sn, Nb, Y). Exemplos de pequenos depósitos isolados são: 6- Cassiporé; 7- Vila Nova; 8- Serra do Navio; 9- Tucuruí; 10- Quatipuru; 11- Manaus. Corpos isolados, em geral protegidos por espessos gossans ocorrem, como: 12- Maraçonai; 13- Maicuru; 14- Seis Lagos (modificado de Costa 1991). Em vermelho, identificação da área de estudo deste artigo.

### Contexto geológico do extremo leste do Amazonas

A porção do extremo leste do Amazonas é caracterizada por terrenos paleoproterozóicos, inclusos na Província Mineral do Tapajós (cf., Figura 2). Estes terrenos são designados pelo Grupo Jacareacanga (2,1 Ga; rochas metassedimentares e metavulcânicas), as suítes intrusivas Parauari (~1,95 Ga; granitos porfíricos), 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 Iri (~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 detrítico-lateríticas e as aluviões. As coberturas detrítico-lateríticas são comuns e reconhecidas por meio de imageamento remoto. Consistem em platôs escarpados de pequenas dimensões e alongados. Esta unidade está sobreposta preferencialmente aos litotipos das formações Alter do Chão e Monte Alegre (cf., Figura 2). 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).

#### 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 que, por sua vez, modifica a distribuição e concentração de radioelementos da rocha fonte. Desta maneira, a gamaespectrometria constitui uma excelente ferramenta para cartografia deste tipo de alvo, pois a concentração dos radioelementos pode ser estimada por meio da intensidade dos picos de emitância dos mesmos e considerando-se que 90% dos raios gama são emanados de cerca de 30 a 45 cm do solo ou rocha, ou seja, é um método geofísico superficial (Wilford et al. 1997). Em geral, o padrão de reconhecimento de lateritas e bauxitas é revelado por quantidades de eU e/ou eTh maiores que a média crustal (relacionados com argilas e/ou óxidos de ferro na parte superior do perfil intempérico), além de baixa contribuição do K, uma vez que este elemento é pouco resistente ao intemperismo, sendo rapidamente lixiviado. Em muitos casos, as características dos radioelementos dos materiais de regolito diferem da rocha subjacente. Isto é devido à reorganização geoquímica e textural dentro do perfil de intemperismo, e pelo fato da fonte de raios gama emanados da superfície terrestre ser primária ou secundária. Fontes primárias relacionam-se com a mineralogia e geoquímica da rocha fresca. Fontes secundárias associam-se à modificação da distribuição de radioelementos em função do intemperismo e pedogênese (Wilford et al. 1997).

Genericamente, pode-se estabelecer uma mobilidade relativa de elementos maiores liberados no intemperismo, adicionando-se suas respectivas respostas gamaespectrométricas. Uma seqüência está apresentada

na Figura 3, sendo que a ordem dos elementos pode mudar de acordo com as condições ambientais.

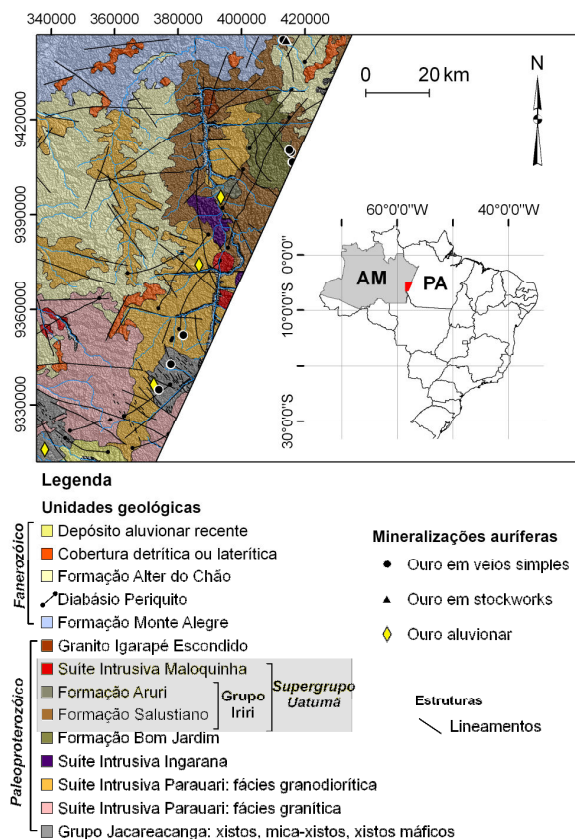


Figura 2. Localização da área de estudo no extremo leste do estado do Amazonas e mapa geológico (modificado de Klein et al., 2001).

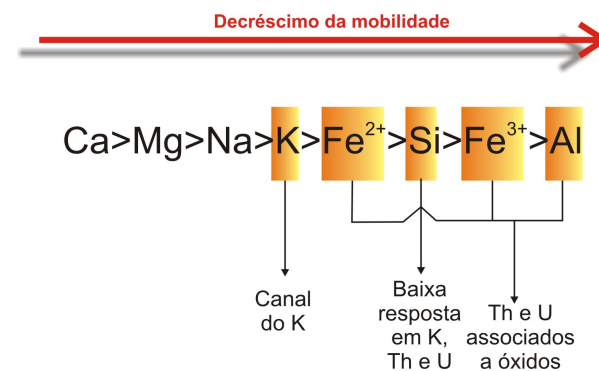


Figura 3. Mobilidade de elementos maiores considerando-se processos intempéricos (modificado de Wilford et al. 1997).

A tendência geral mostra que cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ) são incorporados em minerais de argila (como esmectita e illita) ou perdido em solução. Além disso, o intemperismo pode prover o desenvolvimento de argilas (caolinita) e acúmulo de sílica, ferro e óxido de alumínio.

Medidas gamaespectrométricas de alvos supergênicos, especificadamente de bauxitas provenientes de várias localidades do planeta resultaram em teores 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 contexto, dados de K, eTh, eU e altimétricos foram selecionados para a detecção de superfícies supergênicas do 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 voo de 100 m e espaçamentos das linhas de voo (N-S) e de controle (E-W), respectivamente, de 1 km e 13 km (Lasa Engenharia e Prospecções S.A., 1998). 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.

### Abordagem metodológica

#### Composição colorida e análise de perfis geofísicos

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. Os dados gamaespectrométricos foram processados por Silva

(2003), que empregou o interpolador curvatura mínima e um tamanho da célula do *grid* de 250 m durante a aplicação do micronivelamento baseado em Minty (1991), utilizando-se o algoritmo de Blum (1999). A interpolação dos dados permitiu a produção das imagens dos canais de K, eTh, eU, e das razões K/eTh, eTh/K e K/eU. As assinaturas geofísicas das ocorrências de coberturas supergênicas pré-mapeadas pela CPRM foram analisadas, a partir das imagens da razão eTh/K, SRTM e de eTh em composição colorida ternária RGB, e por meio da verificação das assinaturas dos radioelementos eU e eTh em perfis das linhas de voo (Figura 4).

De forma geral, valores médios observados para eTh e eU compreenderam cerca de 30 ppm e 4 a 5 ppm, respectivamente, para as coberturas supergênicas mapeadas pela CPRM (cf., Figuras 1 e 4).

#### Modelagem de dados espaciais

Para a modelagem de dados espaciais, foram selecionadas as imagens de eTh, SRTM, e das razões K/eTh e K/eU, visto que estas melhor definem o tipo de cobertura supergênica presente na área de estudo.

As técnicas abordadas nesta pesquisa, as lógicas booleana e *fuzzy*, estão inclusas nos modelos guiados por conhecimento que, por sua vez, baseiam-se nas hipóteses e conhecimentos tido por um *expert* (Bonham-Carter 1994).

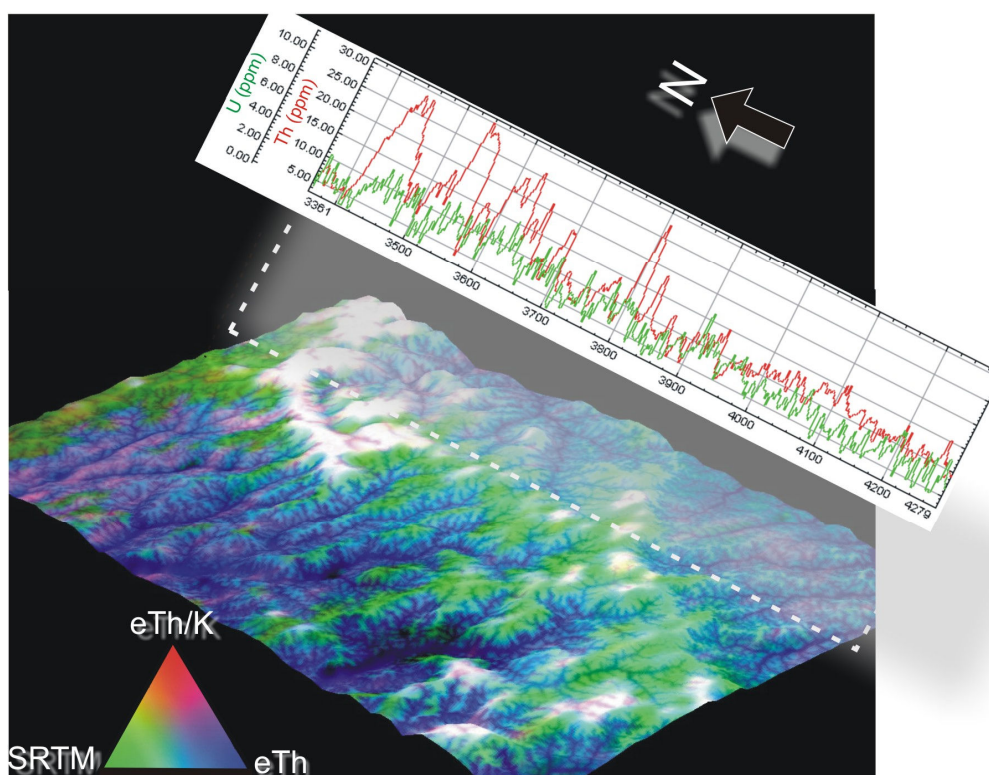


Figura 4. Composição colorida da razão eTh/K, SRTM e eTh em RGB de uma porção da área de estudo, caracterizando-se regiões brancas como potenciais alvos supergênicos. Neste mesmo corte, uma seção em perfil de dados de eTh e eU caracterizam estas áreas por valores altos em ppm.



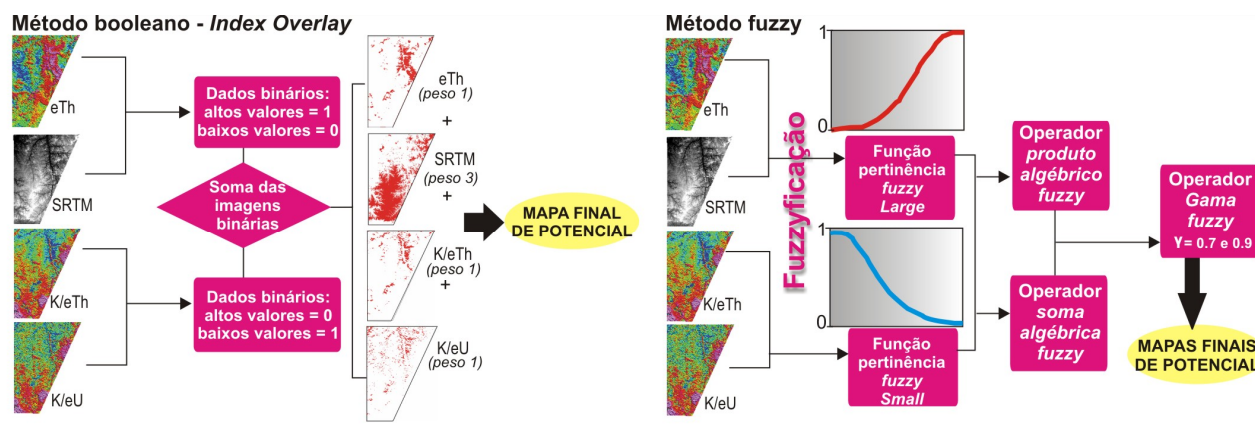


Figura 5. Síntese da aplicação dos métodos booleano e *fuzzy* no estudo de caso.

A lógica booleana compreende uma operação simples que trabalha com a combinação lógica de mapas binários, de forma a supor uma hipótese determinada por um *expert*. A simplicidade do método booleano é observada pelo fato de o resultado gerar as respostas de presença/ausência ou 1/0, sem possibilidades de "talvez". Por tal, este método não é tido como ideal para pesquisa mineral, visto que as áreas determinadas não são variáveis em graus de favorabilidade. Para suprir esta questão, o método booleano *index overlay* foi criado. Este método também baseia-se na combinação de mapas binários, porém, para cada mapa de entrada é atribuído um peso dependente da hipótese considerada. Cada mapa binário é multiplicado pelo fator peso, somado com os outros mapas, e normalizado pela soma dos pesos. O resultado final (mapa previewal) é caracterizado por uma variação de valores entre 1 e 0, que é classificada em intervalos apropriados para o mapeamento proposto (Bonham-Carter 1994).

A lógica *fuzzy* (ou nebulosa) compreende uma modelagem de dados espaciais na qual os dados (mapas) de entrada devem ser inicialmente escalonados em valores de pertinência *fuzzy* em um processo conhecido como fuzzyficação. Desta maneira, os mapas são tratados com a aplicação de uma função de pertinência *fuzzy* (e.g., *small*, *large*, *near* etc) para modificação do mapa em dados ordenados ou intervalares. A pertinência de um conjunto *fuzzy* é expressa em escala contínua que varia entre 0 e 1 (pertinência total) e é determinada de forma subjetiva. Posteriormente, os valores de pertinência *fuzzy* são combinados por meio da escolha de operadores *fuzzy*, tais como: E, OU, produto algébrico, soma algébrica, gama *fuzzy* (Bonham-Carter 1994).

O operador produto algébrico *fuzzy* consiste no produto entre mapas fuzzyficados, sendo o resultado final inferior ou igual à menor contribuição de valores de pertinência *fuzzy* dos mapas de entrada. O operador soma algébrica *fuzzy* compreende a soma de mapas fuzzyficados. Por isso, o resultado final compreende valores superiores ou iguais à maior contribuição de valores de pertinência *fuzzy* dos mapas de entrada. Com a finalidade de contrabalancear os efeitos minimizantes do produto

algébrico *fuzzy* com os valores maximizantes do operador soma algébrica *fuzzy*, aplica-se o operador gama *fuzzy*, marcado pela ausência de influência tendenciosa para a seleção de alvos.

No estudo de caso aqui proposto, a lógica booleana *index overlay* foi aplicada transformando-se os mapas de entrada em binários, conforme ilustrado na Figura 5. Assim, os mapas de eTh e SRTM tiveram seus altos valores (associados a alvos supergênicos) transformados em 1 e os baixos valores em 0. Contrariamente, os mapas das razões K/eTh e K/eU foram binarizados em 1 para áreas e baixo valores e 0 para regiões com altos valores (que não associam-se com produtos supergênicos). O passo seguinte consistiu na soma destes quatro mapas aos quais foram designados os seguintes pesos: 1 para mapas binários de eTh e das razões K/eTh e K/eU; peso 3 para o mapa binarizado da altimetria (SRTM), pois o condicionamento topográfico (platôs) compreende o fator preponderante no desenvolvimento de lateritos e outros produtos intempéricos (Figura 5).

A primeira etapa da aplicação da lógica *fuzzy* consistiu na fuzzyficação dos dados de entrada, com a aplicação da função pertinência *fuzzy large* aos mapas de eTh e SRTM, e da função pertinência *fuzzy small* aos mapas das razões K/eTh e K/eU. Estes quatro mapas re-escalonados foram combinados por meio do operador produto *fuzzy* (valores minimizantes) e também pelo uso do operador soma algébrica *fuzzy* (valores maximizados). Contrabalanceando estes dois resultados, foi selecionado o operador gama *fuzzy* 0,9 (generalização – contribuição aditiva alta) e 0,7 (restrição – contribuição aditiva menor), gerando-se mapas previewais (Figura 5).

Todos os resultados das modelagens de dados espaciais estão apresentados na Figura 6. Para melhor visualização, duas áreas (norte e sul) foram individualizadas.

## Resultados

A caracterização por meio da combinação colorida falsa-cor e os perfis gamaespectrométricos da Figura 4,

mostrou valores de eTh e eU médio de cerca de 30 ppm e 4-5 ppm, respectivamente. Estes valores são similares aos observados em outras localidades do mundo para lateritos bauxíticos, conforme apresentado em Isles e Rankin (2000).

A combinação de vários dados espaciais permitiu a produção de mapas previsionais de alvos supergênicos, conforme mostrado na Figura 6.

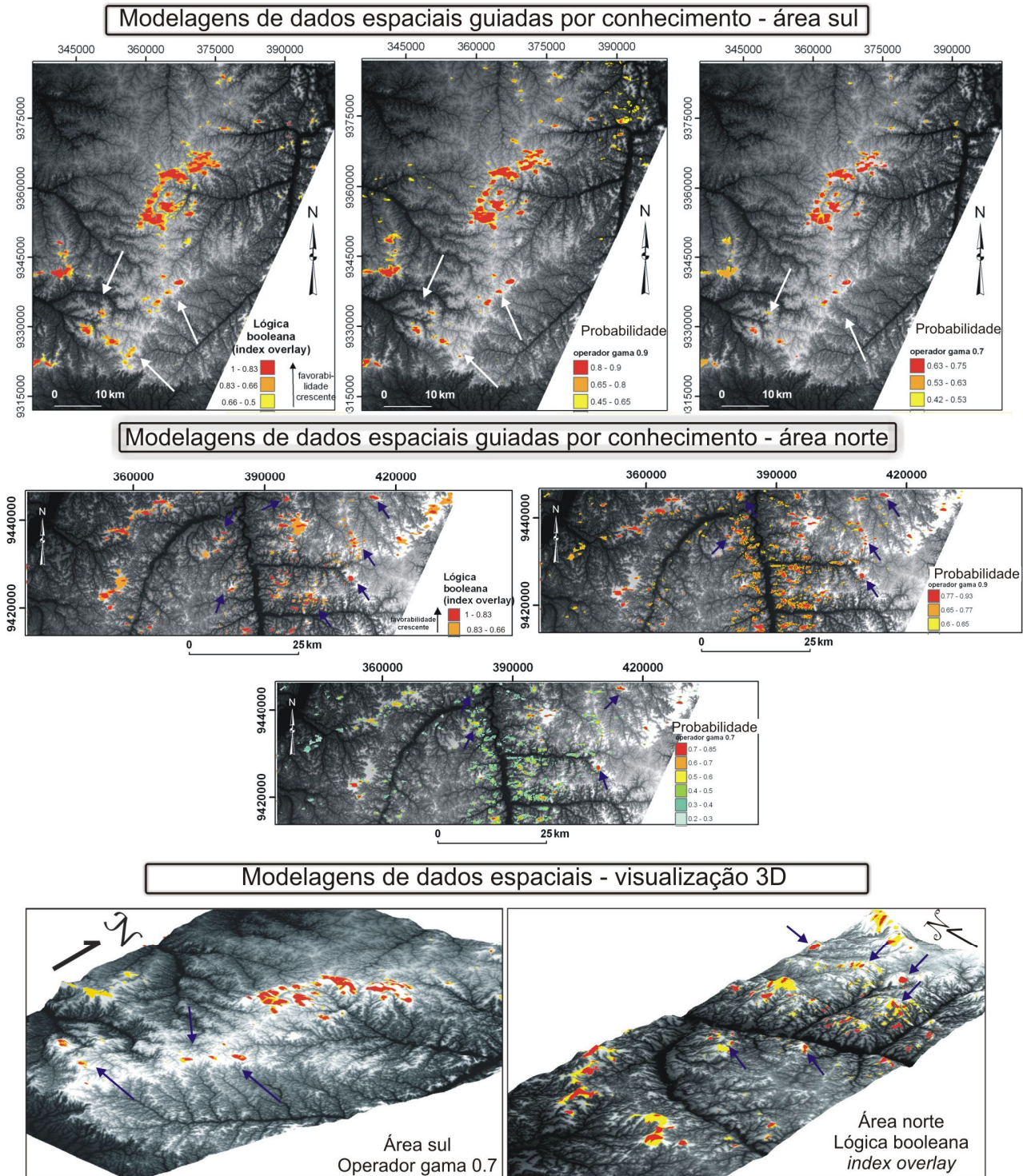


Figura 6. Resultados previsionais para alvos supergênicos gerados com base na aplicação das lógicas booleana e fuzzy. Setas indicam novos alvos selecionados e ausentes no mapa geológico atualmente disponível (cf., Figura 2).

Os resultados mostrados para a área sul, por meio do uso das lógicas booleana (*index overlay*) e dos operadores *fuzzy* gama 0.9 e 0.7, foram similares ao procedimento de combinação colorida e à análise de perfil geofísico (Figura 4), os quais também permitiram a identificação de alvos mais favoráveis. Ainda com respeito à área sul, foi possível, por meio das modelagens de dados espaciais guiadas por conhecimento, selecionar três alvos não cartografados no atual mapa geológico disponível (cf., Figura 2; Klein et al. 2001), mostradas pelas setas.

Outros alvos de menor extensão também foram reconhecidos na área norte, estando os principais e mais condizentes com a relação topográfica assinalados por meio de setas (Figura 6).

Nota-se que a aplicação do operador gama 0.7 restringiu mais as áreas selecionadas como favoráveis em relação ao uso do operador gama 0.9, que gerou um efeito maximizante em ambas as áreas (norte e sul). A utilização da lógica booleana *index overlay* também produziu mapas previsionais com efeitos maximizantes. Entretanto, para a área norte, o método booleano correspondeu ao melhor resultado, pois caracterizou de maneira superior as grandes unidades supergênicas pré-mapeadas (cf. Figura 2), além dos alvos menores reconhecidos neste artigo.

### Conclusões

Os resultados das modelagens de dados espaciais aplicadas neste artigo (Figura 6) foram satisfatórios quanto ao reconhecimento dos grandes alvos supergênicos anteriormente mapeados pela CPRM (cf. Figura 2) assim como na identificação de alvos menores mais promissores, conforme indicado pelas setas na Figura 6. Entretanto, cabe ressaltar que esta metodologia de modelagem guiada por conhecimento, assim como qualquer outra que considere dados de entrada gamaespectrométricos, deve ser utilizada nas etapas iniciais de exploração mineral, visto que esta informação geofísica não informará diretamente um potencial associado a metais específicos (e.g., bauxita laterítica, depósito de níquel etc), mas servirá como uma importantíssima ferramenta de estudo prospectivo regional.

Especificadamente, os maiores alvos lateríticos das áreas sul e norte (alguns deles já investigados por empresa privada), e que coincidem com o mapa geológico de Klein et al. (2001), devem apresentar maior potencial para lateritos ferruginosos e bauxíticos. Este fato baseia-se nas considerações de Costa (1991) que observou a relação da extensão dos corpos lateríticos da Amazônia com o potencial mineral associado (cf., Figura 1).

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CPRM-DIGEOF pela cessão dos dados aerogeofísicos. Thais Andressa Carrino agradece à CAPES pela bolsa de mestrado e ao

Laboratório de Geofísica Aplicada (UnB) pelo suporte técnico. Adalene Moreira Silva agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

### Referências

- Biondi, J.C. Sistema mineralizador laterítico (residual e/ou supergênico). In: J.C. Biondi. Processos metalogenéticos 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.
- Bonham-Carter G.F. 1994. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. Oxford, Pergamon, 398p.
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. Revista Brasileiro de Geociências, 21(2): 146-160.
- 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., Minty B.R.S., Milligan P.R. 1997. The airborne gamma-ray spectrometry response over arid Australian terranes. In: Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration. p. 733-740.
- 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.
- Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 1998. Projeto aerogeofísico Província Aurífera do Tapajós (Bloco I e II): relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Volume 1. Texto técnico.
- Minty B.R.S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. Exploration Geophysics, 22: 591-592.
- 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.
- Wilford J.R., Bierwieth P.N., Craig M.A. 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. AGSO, p. 201-216.