



Análise Prospectiva para Elementos Terra Raras Através da Modelagem Geoestatística e Integração de Dados Aeroradioelementos no Sudoeste de Rondônia

Carlos Eduardo Santos de Oliveira; Elias Martins Guerra Prado; Guilherme Ferreira da Silva; Anderson Alves de Souza; Edgar Romeo Herrera de Figueiredo Iza

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th 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.

Resumo

O presente trabalho trata-se de um relatório contendo dados técnicos organizados para auxiliar o planejamento e tomada de decisões para o desenvolvimento de pesquisa mineral de Elementos Terras Raras (ETR) em Rondônia. O objetivo geral deste trabalho é gerar informações prospectivas para indicação de áreas favoráveis à ocorrência de ETR no estado de Rondônia através da avaliação geoestatística, modelagem e integração de dados aerogamaespectrométricos.

Introdução

Diversos trabalhos executados desde a década de 1960 têm experimentado o desenvolvimento de técnicas e métodos de análise qualitativa e quantitativa utilizando dados aerogeofísicos para pesquisa mineral. Os trabalhos realizados em províncias minerais de outras regiões e a integração de diferentes tipos de dados (multifontes), têm se mostrado bastante práticos como ferramenta prospectiva na exploração mineral (Silva, 1999; Zacchi et al. 2010; Carrino et al., 2011). Salles (2010) com o objetivo de prospecção uranífera emprega a técnica de modelagem geoestatística e integração de assinaturas aeroradiométricas. Baseado neste trabalho foi desenvolvido a metodologia para prospecção de ETR no sudoeste de Rondônia, uma vez que a região apresenta estudos anteriores em prospectos com bom potencial. Esta metodologia tem como objetivo a identificação de novas áreas favoráveis por meio de modelagem espacial de dados aerogeofísicos. Para este estudo foram utilizados produtos gerados a partir de levantamentos aerogeofísicos do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM).

Metodologia/ Problema Investigado

Uma vez que os valores de concentração obtidos na aerogamaespectrometria são derivados de uma relação indireta da intensidade de radiação captada, transformada em equivalentes de concentração por modelos matemáticos, estes valores geralmente são de uso qualitativo e requerem certo processamento para eliminar incongruências geoquímicas (por exemplo, concentrações negativas). Neste contexto, o banco de dados do aerolevantamento do Sudoeste de Rondônia

foi processado de modo a manter a forma da curva, eliminando o menor número de amostras possível de modo que não se altere a população estatística final. De modo geral, os histogramas dos canais processados apresentam a tendência de curvas monomodais assimétricas (Figura 6 1), o que resulta em variações no percentual de amostras restritas por cada Limiar Estatístico. De todo modo, os valores anômalos de maior concentração resultaram em restrição considerável em número de amostras.

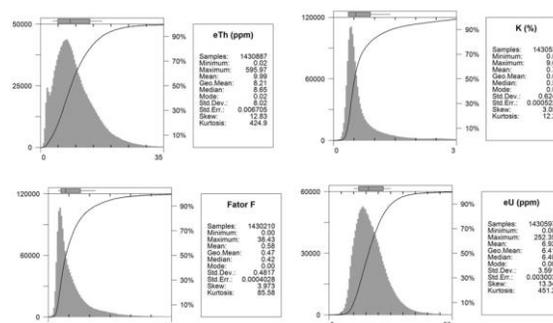


Figura 1 - Histogramas, box-plot e resumo estatístico de cada canal processado neste trabalho

A seleção de valores anômalos de radioelementos seguiu a rotina adotada por Salles (2010), que parte da premissa que toda população de dados estatísticos tende a se aproximar de uma curva normal gaussiana. Deste modo, é possível separar os dados através da relação entre os parâmetros mediana (μ) e desvio padrão (σ) através de parâmetros chamados de "limiares". O Primeiro limiar estatístico em uma curva normal gaussiana representa 68,2% dos dados, isolando amostras anômalas antes (16,4%, $\mu - \sigma$) e após (16,4% $\mu + \sigma$) as amostras restritas. O Segundo limiar isola amostras anômalas correspondentes a 2,3% antes e depois das amostras restritas pela relação mostrada acima. Já o Terceiro limiar isola amostras correspondentes a 0,1% antes e depois da mesma relação, sendo estes valores considerados extremamente anômalos. Como a ocorrência de ETR está associada a valores de concentração alta de Urânio e Tório, as amostras anômalas de interesse para este trabalho correspondem somente às porções do lado direito da curva ($\mu + \sigma$), correspondentes aos altos valores.

Lógica Booleana

A lógica booleana envolve a combinação de dados espaciais através regras lógicas ou expressões dadas para analisar, selecionar e processar dados. Os resultados ou respostas são relacionados simplesmente

a presença/ausência de um determinado fenômeno (1 ou 0). Em se tratando de termos geológicos, ou com forte dependência destes, os resultados podem ser pouco representativos devido às heterogeneidades naturais. Desta forma os resultados tornariam a análise booleana restritiva no estudo de favorabilidade e na seleção de alvos prospectivos. Bonham-Carter (1994) encontrou uma forma de aperfeiçoar a lógica booleana através do método Index Overlay que consiste basicamente em conferir pesos distintos para cada mapa, levando em consideração apenas o nível de importância do mesmo em função da hipótese considerada, assim os resultados seriam menos restritivos e incluiriam um espectro maior de resultados. Nesta pesquisa foram considerados os valores apenas do terceiro limiar para os radioelementos, desta forma, restringindo as áreas consideradas anômalas e aumentando a probabilidade de êxito. O fluxograma da Figura 2 sintetiza o processamento efetuado.

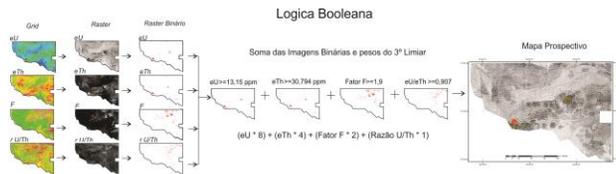


Figura 2 – Fluxograma da estratégia de integração dos produtos da Logica Booleana para os dados de aerogamaespectrometria

Logica Fuzzy

A Logica Fuzzy foi concebida para modelar atributos de evidências em classes de dados espaciais, inicialmente proposto por Zadeh (1965). O conjunto fuzzy é definido pela seleção de funções de pertinência que permitem o escalonamento de dados iniciais em graus de variação entre dois extremos contidos em um conjunto de dados, desta forma a variabilidade entre 0 (ausência de pertinência) e 1 (pertinência absoluta). A utilização intrínseca de uma função de pertinência fuzzy (small, large, categórico, ente outros) permite a reorganização de dados categóricos diversos em mapa de possibilidades fuzzy (Bonham-Carter, 1994). Os operadores fuzzy utilizados frequentemente são E, OU, Produto Algébrico, Soma Algébrica e Fuzzy Gamma, podendo ser observado de forma extensa no trabalhos de Ann et al. (1991) e Bonham-Carter (1994). Segundo Carrino et al. (2011) o operador fuzzy gamma é interessante por contrabalancear os efeitos minimizantes do produto algébrico fuzzy com os efeitos maximizantes do operador soma algébrica fuzzy, característico pela minimização da influencia tendenciosa para seleção de alvos (Bonham-Carter, 1994) (eq. 01).

Eq. 01:

$$\mu \text{ gama} = (\mu \text{ soma})^\gamma * (\mu \text{ produto})^{1-\gamma}$$

O Fluxograma da Figura 3 exemplifica de forma simples as etapas de processamentos adotadas neste trabalho.

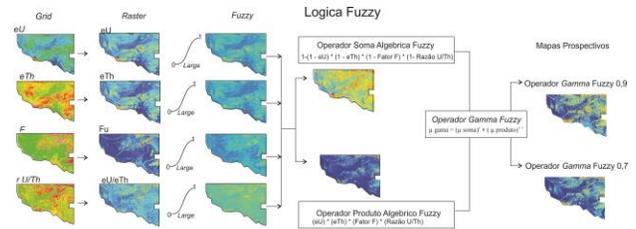


Figura 3 – Fluxograma da estratégia de integração do produtos da Logica Fuzzy para os dados de aerogamaespectrometria.

Resultados

Após as correções do canais, foram gerados os mapas aerogamaespectrometria (Figura 4) de U e Th, equivalentes em ppm, fator F e da razão U/Th. Os mapas de distribuição de U e Th podem indicar por conseguinte áreas anômalas na concentração deste elementos, decorrente de uma análise qualitativa dos teores. Neste caso é possível correlacionar com o contexto geológico desta área, destacando a maior concentração em corpos de granitoides. Entretanto, o contraste de background pode indicar uma falsa anomalia positiva em determinada área. De forma geral, litotipos com perfil laterítico bem desenvolvido, mostram alta concentração de tório e baixa porcentagem de teor de K. Os mapas das razão eU/eTh mostram comportamentos geoquímicos não uniforme para determinados corpos de granitoides. É observado aumento da razão em drenagens de primeira ordem e em superfícies de taludes. O mapa do parâmetro F (Efimov, 1978; Gnojek e Prichystal, 1985; Pires, 1995) ressalta simultaneamente a abundância do K e da razão eU/eTh.

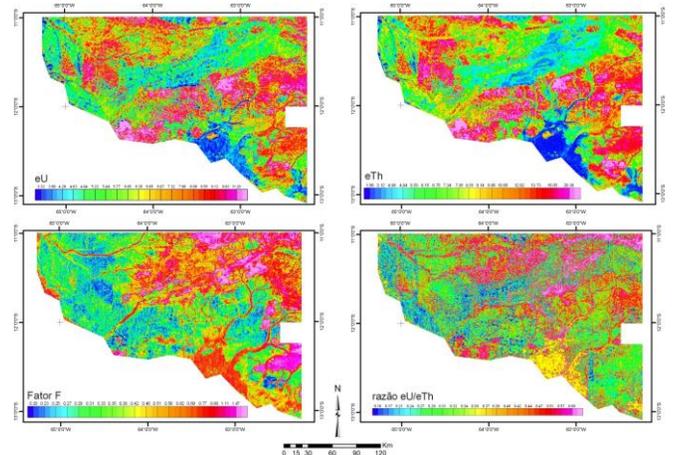


Figura 4 - Mapas de aerogamaespectrometria do conjunto de dados.

Na modelagem quantitativa booleana foi aplicado o conceito prospectivo proposto por Salles et al. (2010) para prospecção uranífera no depósito de U-ETR de Mary Kathleen, Austrália. Foram selecionados os mapas por meio da equação $\mu \pm 3\sigma$, que restringiu os dados acima do terceiro limiar. Esta técnica tem proposição restritiva, onde demilitou-se áreas prospectivas

integrando os quatro mapas através do operador booleano AND. Desta forma os alvos para prospecção foram determinados por meio da correlação destes mapas (Figura 5). As áreas anômalas mapeada pelo terceiro limiar foram de 85,48 km² (eU), 94,03 km² (Th), 17,34 km² (eU + eTh + Fator F) e 0,63 km² (eU + eTh + Razão U/Th). Um destes alvos prospectivos coincide com uma área conhecidamente anômala para ETR (alvo I).

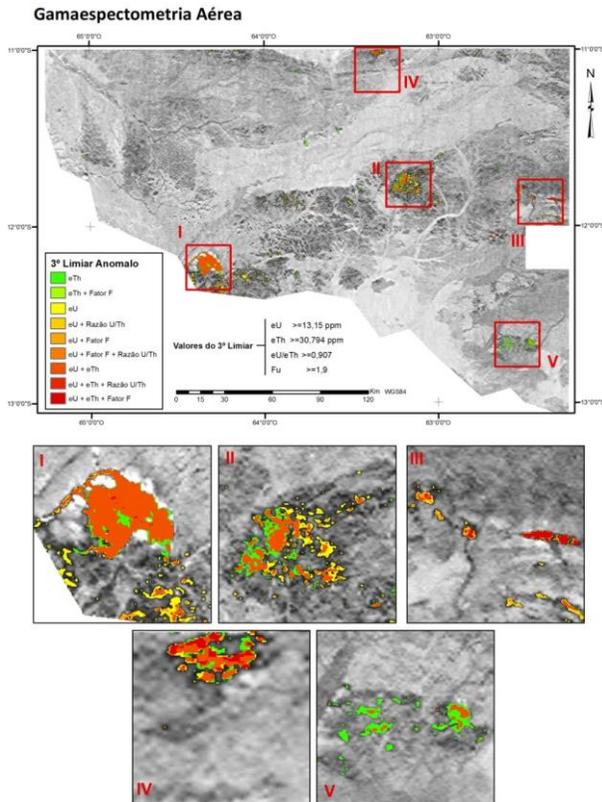


Figura 5 - Mapa prospectivo de integração do terceiro limiar anômalo.

Na modelagem Fuzzy foram categorizadas os mapas pela pertinência da função Large e posteriormente integrados pela Soma Algébrica e o Produto Algébrico Fuzzy. Os mapas prospectivos apresentados abaixo com cenário mais otimista (Figura 6) e menos otimista.

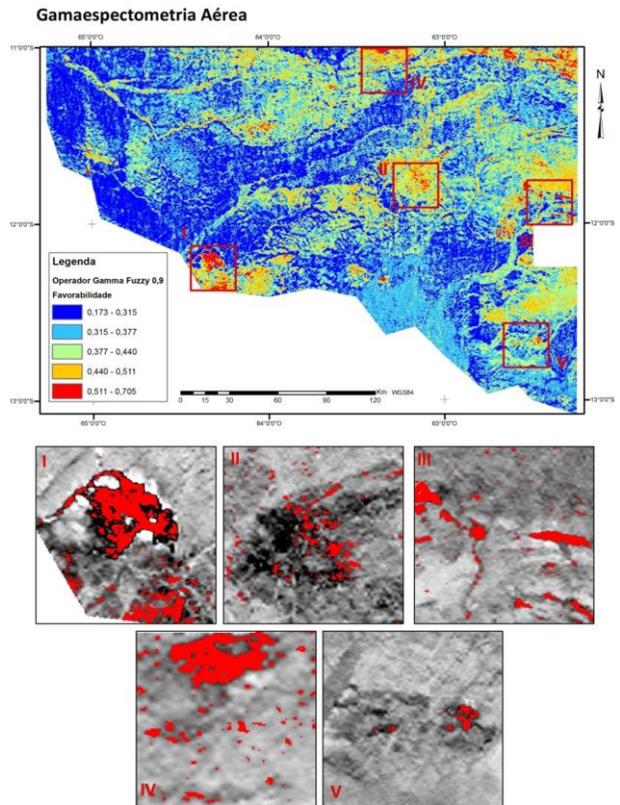


Figura 6 - Mapa previsual pelo Operador Γ 0,9.

Discussão e Conclusões

Os mapas gerados a partir dos modelos prospectivos booleano e Fuzzy estão em meio de uma área caracteristicamente de pouco conhecimento geológico, sendo a análise prospectiva através destes modelos, uma ferramenta essencial na pesquisa prévia de ETR. A modelagem booleana permitiu a determinação de 5 áreas como alvos em potencial para ETR, incluindo inclusive o corpo granítico da Suíte Intrusiva Costa Marques (alvo I), já conhecidamente anômalo para ETR. Outros corpos graníticos foram identificados como áreas prospectivas: a) Suíte Intrusiva Rio Pardo, fácies São Luiz (alvo III), quartzo-monzonito a sienito deformados pelo evento Sunsás, contexto tectônico do Nova Brasilândia. b) Granito Alto Saldanha (alvo V), monzo a sieno-granitos parcialmente encoberto por sedimentos cenozoicos da bacia do Guaporé. Os alvos II e IV não são associados a nenhum litotipo, porém sua morfologia sugere a característica de corpos intrusivos de menor tamanho, não cartografados em trabalhos de mapeamento anteriores. Os mapas derivados a partir da logica Fuzzy geraram possibilidades prospectivas regulares, e coincidentes com o modelo booleano. Ainda possibilitou o mapeamento de alvos não evidenciados pelo método booleano nos mapas prospectivos de cenário mais otimista e menos otimista. Dessa forma, considerando o tamanho dos alvos gamaradiométricos e os padrões de resposta apresentados, sugerem-se etapas de campo que possam ratificar os modelos apresentados seguindo

o grau de importância/prioridade de cada alvo, na seguinte ordem: I, II, III, IV e V.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Serviço Geológico do Brasil pela disponibilidade dos dados aerogeofísicos.

Referências

Bonham-Carter G.F., 1994. Geografic Information Systems for Geoscientists: modeling with GIS. Oxford, Pergamon, 398p

Carrino, T.A., Silva, A.M., Botelho, N.F., Silva, A.A.C., 2011. Logica Fuzzy e Técnica SAM para Modelagem Previsional do Ouro no Setor Oeste da Província Mineral do Tapajós Usando Dados Aerogeofísicos e de Sensoriamento Remoto. Revista Brasileira de Geofísica 29(3): 535-554

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2010. Projeto Aerogeofísico Sudoeste de Rondônia – Relatório Final do Levantamento e Processamento de dados magnéticos e gamaespectrométricos. Rio de Janeiro: Lasa Engenharia e Prospecções; Prospectores Aerolevantamentos e Sistemas, 2006. 27v.

IAEA, 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. 179 pp.

Salles, R. R. 2010. Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR Mary Kathleen, noroeste de Queensland, Austrália: uma investigação baseada em assinaturas hiperespectrais e aeroradiométricas. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – UniCAMP, Instituto de Geociências. 121 pp.

SCANDOLARA, J. E. (Org.). Geologia e recursos minerais do Estado de Rondônia: texto explicativo e mapa geológico do Estado de Rondônia. Escala 1:1.000.000. Brasília: CPRM, 1999. 97 p.

SCANDOLARA, J. E. Geologia e evolução do terreno Jamari, embasamento da faixa Sunsás/Aguapeí, centro-leste de Rondônia, sudoeste do Cráton Amazônico. 2006. 383 p. Tese (Doutorado)-Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVA, A. M. Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao

greenstone belt Rio das velhas, Quadrilátero Ferrífero. 1999. 195 p. Tese (Doutorado)- Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

Zacchi, E.N.P., Silva, A.M., Rolim, V.K., 2010. Análise Integrada de Dados Multifonte e Sua Aplicação no Mapeamento Geológico das Formações Ferríferas da Serra de Itapanhocanga, Alvorá de Minas, MG. Revista Brasileira de Geofísica (2010) 28(4): 643-656

Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy Sets. Information and Control, v.8, p338-353. Disponível em: <http://www.bisc.cs.berkeley.edu/BISCPprogram/default.htm>
Almeida, F. F. M. de, 1969. Diferenciação tectônica da Plataforma Brasileira (Tectonic differentiation of the Brazilian Platform). Proceedings 33rd. Brazilian Geological Congress, Salvador(BA), Brazil, vol. 1: 29-46.