

Ocorrências de Elementos Terras Raras em rochas alcalinas da Suíte Ouro Fino, Costa Marques, Rondônia, Brasil – descrição e modelo para prospecção geofísica e geoquímica

Tiago Buch (tiago.buch@cprm.gov.br)

Lucy Takehara Chemale¹ (lucy.chemale@cprm.gov.br)

Guilherme F. da Silva (guilherme.ferreira@cprm.gov.br)

Wilson L. de Oliveira Neto (wilson.oliveira@cprm.gov.br)

CPRM – Serviço Geológico do Brasil, REPO – Residência de Porto Velho

¹CPRM – Serviço Geológico do Brasil, SUREG-PA – Superintendência Regional de Porto Alegre

Abstract

This work is a first approach on the REE occurrence of the Ouro Fino Intrusive Suite, a peralkaline granite with A-type affinity located at the Brazilian-Bolivian border. An integration of geochemical data from soil samples from previous surveys of the Geological Survey of Brazil with airborne geophysical data resulted in a prospectivity model. Through the geochemical data, it is possible to identify anomalies of REE constrained to the granite body and to correlate the REE anomalies to U and Th concentrations in the soil. This correlation is used to develop a model of prospectivity using geophysical data. The model allowed the identification of the anomalous areas within the granitic domain and discriminates the granite from the surrounding rock units

Keywords: REE, Soil Geochemistry, Alkaline granite .

Palavras-chave: Terras raras, Geoquímica de Solo, Granito Alcalino.

INTRODUÇÃO

Consoante a Wall (2012), os elementos terras raras (ETR) se tornaram insubstituíveis na indústria tecnológica, o que resultou na classificação desses elementos como estratégicos para a economia. Com intuito de compreender melhor a ocorrência mineral e distribuição de ETR de Costa Marques, se fez este informe.

A ocorrência de ETR na região de Costa Marques, sudoeste de Rondônia (Figura 1), se tornou conhecida através dos trabalhos de Torres et al. (1979), quando se identificou xenotímio em concentrados de bateia. Em meados da década de 1980, a CPRM executou trabalhos de mapeamento básico e prospecção geoquímica, identificando bastnaesita na região da Serra Grande, em Costa Marques (FREITAS, ROMANI; VIEIRA, 1985). Essa descoberta associada com anomalias radiométricas observadas na região fez com que a CPRM requeresse áreas para pesquisar as possíveis ocorrências de terras raras (Costa, 1990).

As alíquotas analíticas das amostras de solo e rocha coletadas por Costa (1990) foram reanalisadas e os resultados são apresentados nesse informe. Adicionalmente, os dados geofísicos do Projeto Levantamento Aerogeofísico do Sudoeste de Rondônia (CPRM, 2010) foram utilizados e correlacionados com os resultados geoquímicos das amostras reanalisadas (Figura. 1B).

Em seu estudo prospectivo, Costa (1990) identificou anomalias geoquímicas de Y, La, Zr e Ti nas amostras de solo na área estudada. Conforme relatório interno (CPRM, 1988), encontrou-se bastnaesita e ainda em Costa (1990) é mencionada a existência de zircão, titanita e monazita, além de xenotímio identificado por Torres et al. (1979). No presente trabalho, identificamos nas amostras de solo teores anômalos de La, Nd, Yb e Y, que podem ser indícios de mineralização de ETR. A correlação dos dados geológicos, geoquímicos e geofísicos possibilitou separar/refinar as áreas anômalas em diferentes domínios geoquímicos.

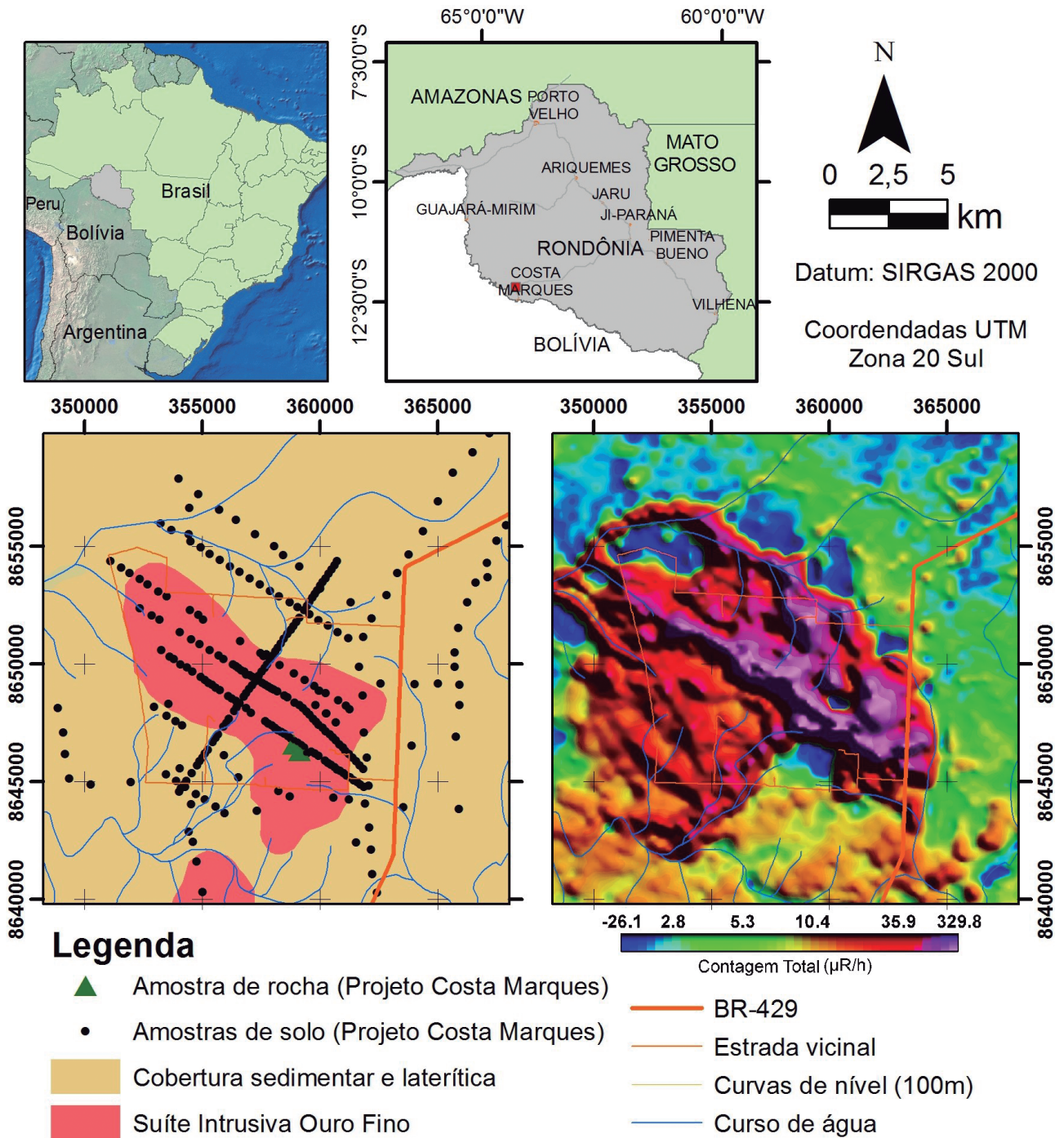


Figura 1 - Localização da área de trabalho; a) Mapa de localização da área amostrada com espacialização das amostras de solo analisadas; b) Mapa Radiométrico de Contagem Total e anomalia associada às rochas da Suíte Ouro Fino e aos aluviões e coluviões derivados desta unidade.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Costa (1990) relata a existência de traquitos e feldspato alcalino granitos com aegirina e anfíbios. Bettencourt et al. (2012) definem que os feldspato-alcalino granitos (“egirina-augita-riebeckita quartzo-sienitos e álcali-feldspato granitos”) da localidade de Costa Marques, pertencem à Suíte Intrusiva Ouro Fino, e têm idades de 1.349 ± 9 Ma com datação U-Pb em zircão pelo método SHRIMP. Payolla et al. (2013) observaram que a SIOF é composta por rochas ferrosas, alcalinas a álcali-cálcicas, peralcalinas e que apresentam características de granitos tipo A.

Conforme os dados de Costa (1990) e Quadros e Rizzotto (2007), circunda as rochas magmáticas uma cobertura laterítica-sedimentar cenozoica. Conforme esses autores, esses sedimentos seriam eluvio-coluvionares, resultantes da erosão lateral das escarpas da Serra dos Uopianes. Torres et al. (1979) descreve processo intenso de laterização nesta cobertura, com formação de crostas lateríticas de até 40 metros de espessura.

MATERIAIS E MÉTODOS

As alíquotas analisadas são de amostras de solo e rochas coletadas por Costa (1990). Essas alíquotas foram analisadas pela SGS Geosol através do

método IMS95AS (fusão com metaborato de lítio, leitura por ICP-MS para altos teores ETR) para o solo e rocha e método ICM40B (digestão multiácida, leitura por ICP-MS - 32 elementos) para rocha. Os elementos das amostras de solo analisadas são: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Th e U. Nas alíquotas de rocha, além dos ETR, foram analisados também elementos relevantes como Hf, Zr, Ta e Nb; assim como Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, In, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, S, Ti, Tl, V, W e Zn (disponíveis para download em <http://geosgb.cprm.gov.br>).

A modelagem geoquímica utilizou a estatística uni variada para determinar a distribuição das faixas de teores de ETR, Y, U e Th e bivariada para determinar as correlações entre eles. Dentre os ETR analisados foi apresentada a modelagem geoquímica com os limiares de anomalia calculados através de box-plot e a matriz de correlação para os elementos La, Ce, Nd e Y, pois além destes serem os principais constituintes dentre os analisados, apresentaram mais de 70% dos resultados acima do limite inferior de detecção (LID). Para avaliar as variações entre ETR leves (ETRL) e pesados (ETRP), os resultados de Yb foram todos considerados a fim de se obter uma razão La/Yb. Assim, pode-se avaliar o enriquecimento de ETRL em relação ao ETRP.

Os dados aeroradiométricos utilizados são oriundos do levantamento 1106 – Sudoeste de Rondônia (CPRM, 2010). Os dados estão organizados em linhas de voos espaçados de 500 metros entre si, com uma leitura radiométrica executada a cada 80 metros em linha, cuja altura de voo nominal é 100 metros em relação à superfície. Neste trabalho, estas informações são tratadas de forma quantitativa por meio de análises estatísticas visando estabelecer as concentrações anômalas dos radioelementos (K, eTh e eU). Os dados foram processados em plataforma SIG através dos softwares Oasis MontajTM versão 9.2 e ArcGIS for DesktopTM versão 10.2 e interpolados pelo método da Curvatura Mínima, com células de 125 metros.

MODELAGEM GEOQUÍMICA

Os principais constituintes utilizados para esse estudo de correlação foram La, Ce, Nd e Y (ETR+Y). Foi possível definir cinco domínios geoquímicos com características distintas de associação e predomínio dos elementos analisados (Figura 2, domínios referidos como cores). Em 73 amostras situadas na porção norte-nordeste do maciço granítico não foram detectados os elementos selecionados. Tais dados foram suprimidos das etapas que envolvem tratamento estatístico e correlações.

O domínio cinza (Figura 2) apresenta teor de ETR+Y abaixo de 0,1%, e tem Ce e La com teores médios de 0,02% e picos que chegam a 0,06%. A área verde denota concentrações de ETR+Y entre 0,1% e 0,3%, tem teores médios de Ce e Y 0,07% e 0,06%, respectivamente. Neste domínio destacam-se também o La e o Nd com teor médio de 0,02%. Eventualmente ocorrem Dy, Er, Yb, bem como o Th; em quantidades levemente acima do limite inferior de detecção.

Já no contexto quase exclusivo ao maciço granítico e seus coluviões, a região laranja (Figura 2) apresenta teores de ETR+Y entre 0,3% a 0,8%. Este domínio revela razões La/Yb entre 1 e 7,5, é o que tem os limites mais próximos ao corpo granítico (Figura 3). Neste domínio, as concentrações médias de La são 0,05%, Ce 0,26%, Nd 0,03% e, Y 0,12%. O Yb se revela nesta área um teor médio de 0,01% e o Th, 0,02%, sugerindo a correlação de Th com a SIOF.

A superfície vermelha mostra ETR+Y em concentrações >0,8% e é a que apresenta as maiores médias, tal como os maiores teores absolutos dentre as amostras analisadas. Para os ETRL, os teores médios são: La: 0,2%; Ce: 0,5%; Pr: 0,03%; Sm: 0,02%; Nd: 0,1%. Entre os ETRP + Y, tem-se: Gd: 0,02%; Dy: 0,03%; Er e Yb: 0,02% e Y: 0,2%. O Th ocorre em quantidade média de 0,04% e com máxima de 0,13%. O U foi detectado somente junto às regiões de mais alto teor de ETR+Y com valores até 0,13%.

A distribuição estatística de ETR+Y, ETRL, ETRP+ Y assim como a de La, Ce, Nd e Y em cada domínio definido está disponível na Figura 4.

As distribuições estatísticas de ETR+Y, ETRL e ETRP+Y evidenciam que os maiores teores estão concentrados nas áreas vermelhas e laranjas do mapa da Figura 2, que correspondem as mesmas áreas com alto índice de prospectividade (ver mais em Modelagem Geofísica). Tanto o domínio cinza quanto verde

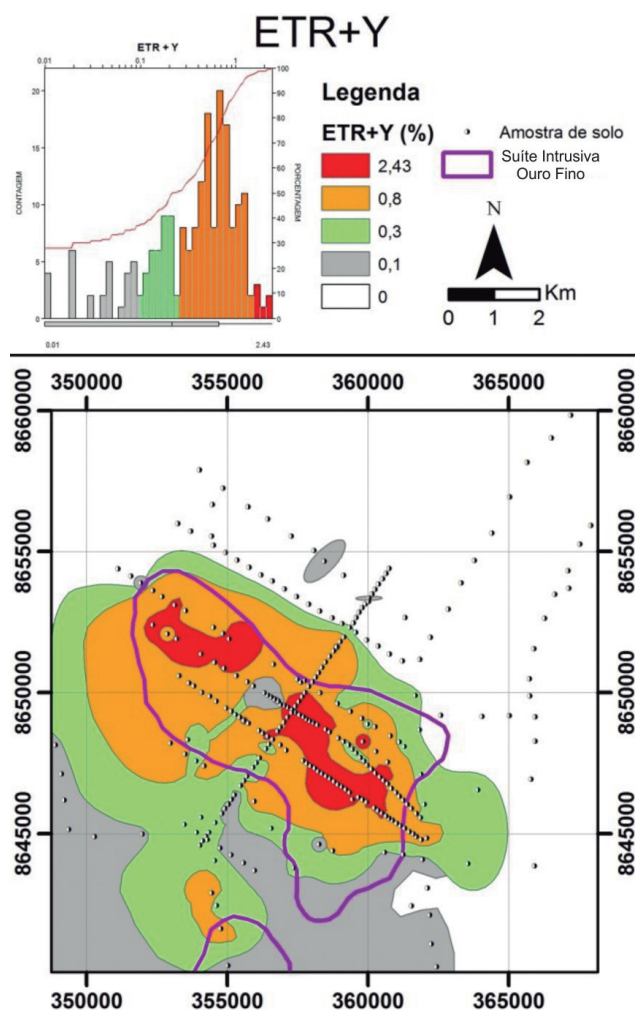


Figura 2 - Mapa de distribuição de ETR+Y através de krigagem ordinária reclassificada.

apresentam em geral teores absolutos baixos, não se mostrando interessantes do ponto de vista metalogenético. Ainda, claramente pode-se ver nos gráficos box-plot que em ambas as áreas de altos teores, os ETRL predominam sobre ETRP+Y (Figura 4). Isto é mais bem destacado pelo mapa de razão La/Yb (Figura 3). Nos domínios alaranjados e vermelhos são notoriamente mais enriquecidos em ETRL em relação aos ETRP.

Para La, Ce, Nd e Y, os box-plots mantêm o padrão de ETRL/ETRP>1. Todavia, o Ce mostra um comportamento diferente dos demais na área em branco do mapa (Figura 2). O comportamento anômalo do Ce é atribuído a processos de laterização que são muito intensos nesta região.

MODELAGEM GEOFÍSICA

Para a elaboração de um modelo prospectivo de ETR+Y, é necessário compreender a relação dos ETR+Y com os dados radiométricos. Isso porque esses elementos apresentam uma forte correlação com os radioelementos, principalmente o Th e U, pois grande parte dos minerais carreadores de ETR também comportam esses elementos radioativos. Assim, como premissa para essa modelagem, uma matriz de correlação linear com os elementos anali-

sados foi elaborada (Tabela 1). Uma vez confirmada a premissa de correlação positiva entre os ETR e o U e o Th, foi possível associar estes elementos radioativos às concentrações de ETR+Y. Essa correlação varia de moderada à forte dependendo da afinidade destes elementos.

A correlação forte do Th com o Ce, é interpretada aqui como devida ao enriquecimento do Ce em ambiente supergênico. O U, demonstra correlação moderada com La e Ce nas amostras de solo, possivelmente por ser mais móvel nessas condições.

Como anomalia radiométrica atribuída à SIOF, delimitou-se a zona de maior intensidade de Contagem Total de radiação, com valores superiores a 300 µR/h. Desta forma, mesmo em um mapa radiométrico regional é fácil separar o granito da cobertura adjacente. De maneira quantitativa, são mostrados aqui resultados que servem para separar a intrusão félsica como alvo prospectivo, bem como identificar a área que contém mais radioelementos e, conseqüentemente, ETR+Y dentro desse alvo.

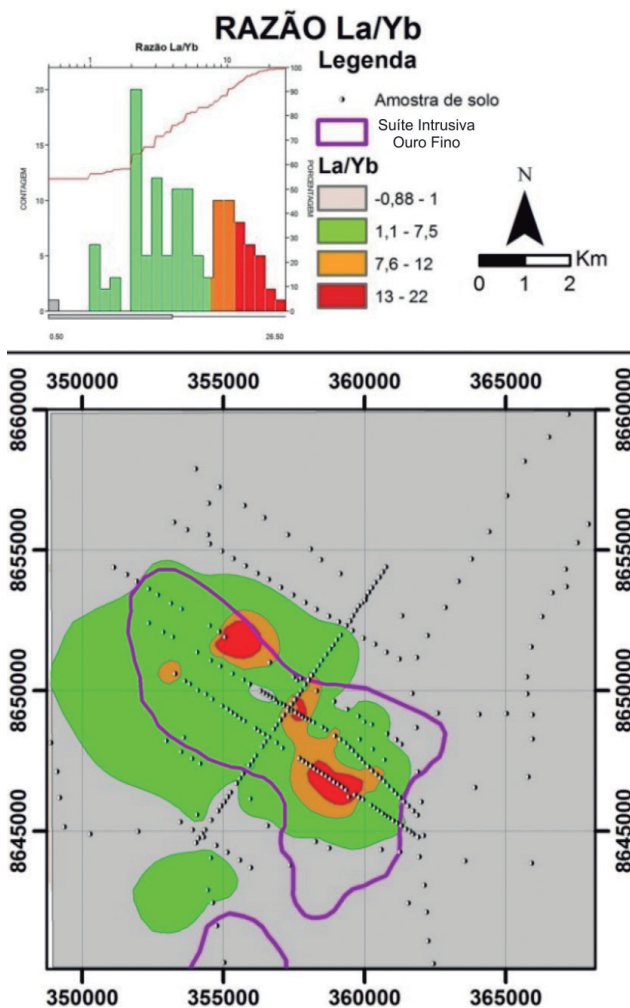


Figura 3 - Mapa da razão La/Yb elaborado através de krigagem ordinária.

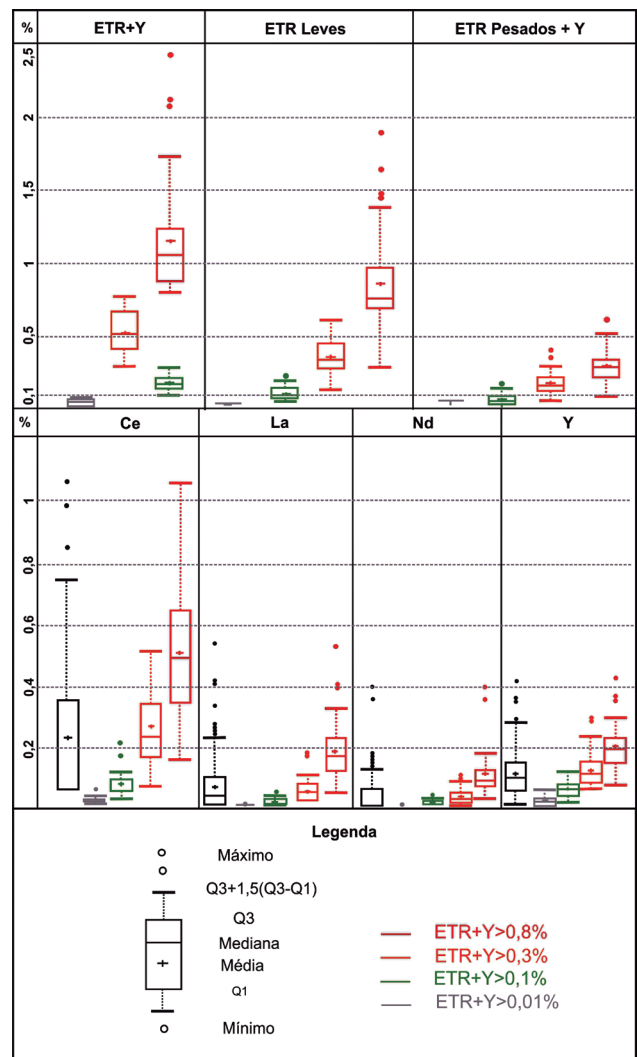


Figura 4 - Box-plot dos ETR+ Y, ETR leves, ETR pesados+Y e dos elementos Ce, La, Nd e Y, classificados e separados por domínios definidos pelas cores cinza, verde, alaranjado e vermelho e correlatos aos domínios da Figura 2, bem como em preto para todas as amostras com teor de ETR+Y>0,3 (área branca na Figura 2).

Tabela 1 - Matriz de correlação de elementos selecionados obtidos das análises químicas de solo.

Elemento	La	Ce	Y	Th	U
La	1	0,7	0,7	0,6	0,5
Ce	0,7	1	0,7	0,9	0,7
Y	0,7	0,7	1	0,5	0,5
Th	0,6	0,9	0,5	1	0,8
U	0,5	0,7	0,5	0,8	1

Quando comparado à razão eU/eTh, nota-se que a maior parte da população atribuída à Suíte Ouro Fino tem concentração de K (%) superior a 1,75%. Enquanto 98% da população atribuída aos sedimentos colúvio-lateríticos possuem valores de K inferiores de 0,3%. Desta forma o canal do Potássio indica ser uma boa ferramenta para separação entre granito e cobertura quando apresentam altos valores radiométricos (Figura 2).

Isto pode ainda ser percebido através dos gráficos box-plot adjacentes ao gráfico da Figura 5. O box-plot alaranjado, referente à cobertura, denota maior variação na razão eU/eTh, e para o K, uma variação menor. E para a Suíte Ouro Fino, os teores de K (%) são mais elevados, destacando a natureza alcalina da rocha, com concentrações entre 1,8 a 3,1%. Os valores eU/eTh dessa suíte variou tanto quanto os valores da cobertura cenozoica vicinal. Todavia, a mediana, Q1 e Q3 são relativamente maiores, o que permite a separação dos granitos alcalinos da cobertura colúvio-laterítica contígua.

A análise individual dos canais eU e eTh mostram em histograma, distribuições não paramétricas, com concentrações chegando a 245 ppm e 580 ppm, respectivamente. Esses valores anômalos estão restritos majoritariamente a regiões dentro do maciço rochoso da Suíte Ouro Fino (Figura 6). A primeira aproximação estatística foi realizada com base nos limiares dos diagramas box-plot, cujas classes de mapa foram geradas após esta etapa, baseado na quantidade de áreas representadas.

Assumindo que os valores de eTh e eU são correlatos às ocorrências de ETR, desenvolveu-se um mapa de favorabilidade para ETR baseado nesses valores. Para definir os valores anômalos foi utilizada a equação 1:

$$\text{Eq. 1} \quad K\% * (eTh + eU)$$

Os valores de favorabilidade são obtidos pelos critérios radiométricos, que separam as classes prospectivas em regiões de maior probabilidade, pela identificação de áreas com alta concentração de eU e eTh, e conseqüentemente ETR. Apesar dessa correlação já ser conhecida, o refinamento de áreas potenciais em classes prospectivas é uma ferramenta que auxilia na delimitação do depósito. O mapa de favorabilidade para mineralização de ETR+Y mostra que estes elementos estão condicio-

nados ao domínio do corpo granítico (Figura 7). Ainda, as áreas com maiores potenciais estão na borda nordeste do corpo.

DADOS LITOGEOQUÍMICOS

No acervo de amostras de rocha referentes ao Projeto Costa Marques, apenas duas alíquotas de anfibólio-aegirina-feldspato alcalino granitos da área foram recuperadas (Figura 1). Os dados químicos produzidos neste trabalho indicaram teor médio de ETR+Y de 10.900 ppm, e a razão média ETRL/ETRP é de 3,46. Para as concentrações de óxidos de ETR, as análises químicas indicaram teor médio de TReO (total rare earth oxide) de 1,08%. Os teores de ETR+Y e Th e U, e também os de Zr, Hf, Nb, são significativos e estão expostos na Tabela 2.

COMENTÁRIOS FINAIS

A modelagem geoquímica em amostras de solo confirma que a ocorrência de ETR descrita por Torres et al. (1979) pode ser considerada como alvo exploratório. Os teores médios de ETR+Y de até 2,4% nas porções centrais do corpo granítico destacam que o potencial mineral para ETR está restrito à rocha. As coberturas sedimentares e lateríticas cenozoicas ao redor da SIOF não apresentaram resultados que sugerem mineralização.

Em termos de potencial econômico, os resultados indicam que os ETRL são mais proeminentes, e, portanto, mais abundantes que ETRP. Porém os valores de ETRL/ETRP nas análises de rocha são menores se comparados aos valores das amostras de solo. Os minerais bastnaesita e xenotímio identificados em estudos pretéritos são inferidos aqui como os prováveis portadores de La, Ce e Y. Os teores de Ce anômalos em relação aos demais ETR nas coberturas cenozoicas são claro indício de condições oxidantes ligadas à laterização.

O uso das razões radiométricas eTh/eU versus o canal de Potássio indicou ser uma boa ferramenta para separação entre granito e cobertura cenozoica quando esses apresentam altos valores radiométricos. Entretanto a fácil discriminação entre estas unidades geológicas provavelmente ocorreu devido a escala de detalhe e a aparente simplicidade da geologia local, apresentando dois litotipos cartografados. O tratamento estatístico de eTh e eU, após a verificação da correlação entre alguns ETR e os mesmos, indicou com maior detalhe as zonas prospectivas, confirmadas pelas informações de prospecção geoquímica.

A equação proposta se mostrou adequada para a prospecção de ETR na SIOF. Isto foi possível baseado na premissa de que as áreas de interesse se encontram alojadas na rocha granítica de natureza alcalina (o granito apresenta valores de potássio superiores às rochas adjacentes) e pela verificação da correlação positiva entre eU, eTh e alguns ETR.

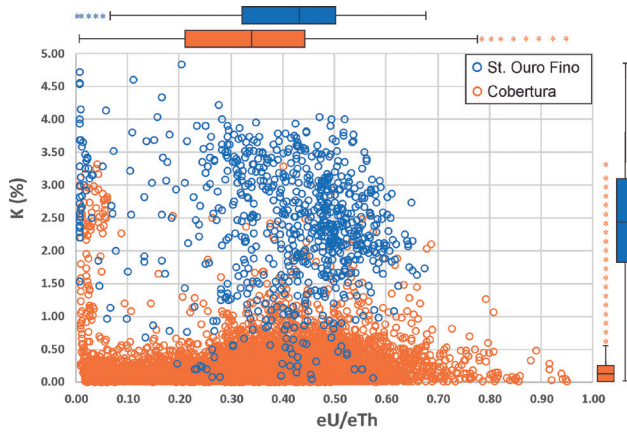


Figura 5 - Diagrama de dispersão de razão eU/eTh por K (%) para amostragens da Suíte Ouro Fino e da região de “Cobertura”, notar as diferentes dispersões para as amostras referentes à Suíte Ouro Fino (azul) e a Cobertura (laranja), também evidenciado nos box-plot ao lado de cada eixo. A mediana de K (%) e eU/eTh para os dados referentes a St. Ouro Fino apresenta valor superior do que a mediana referente aos dados da cobertura. Embora muito disperso, os dados da St. Ouro Fino também apresentam uma correção negativa fraca de K (%) e da razão eU/eTh, possibilitando a hipótese de que nos pontos com maior concentração de eU, há uma tendência a valores inferiores de K.

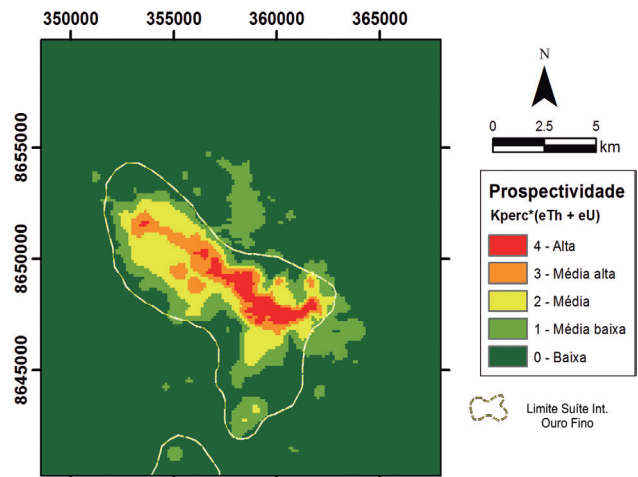


Figura 7 - Mapa de favorabilidade construído através da soma e produto das respostas de radioelementos. As classes prospectivas também podem ser utilizadas para identificar a provável natureza do material, sendo as classes 0 e 1 atribuídas a coberturas (laterita, coluviões e alúvios), e as classes 2, 3 e 4 atribuídas à diferentes fácies da Suíte Ouro Fino.

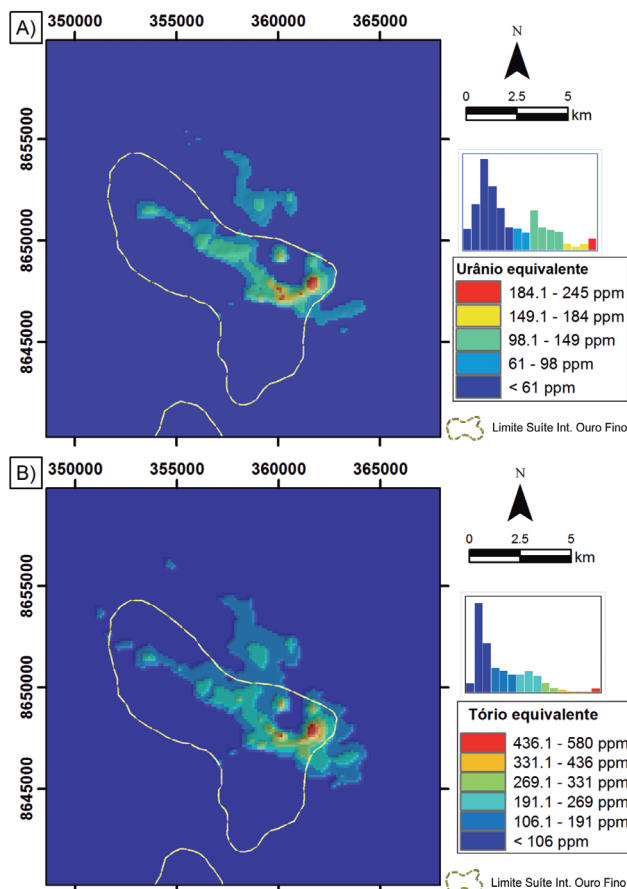


Figura 6 - Mapa de radioelementos classificados segundo os respectivos valores anômalos: a) Mapa de Urânio equivalente (ppm) separado em cinco classes de concentração superior a 61 ppm; b) Mapa de Tório equivalente (ppm) separado em seis classes de concentração superior a 106 ppm.

Tabela 2 - Teores de Zr, Hf, Nb, Th, U, ETR+Y, TREO e razão ETRL/ETRP dos granitoides da Suíte Ouro Fino.

Amostra	2374-LL-R-08	2374-LL-R-10
La (ppm)	1809	1983
Ce (ppm)	4936	3320
Pr (ppm)	411	476
Nd (ppm)	1492	1718
Sm (ppm)	284	319
Eu (ppm)	21	21
Gd (ppm)	229	266
Tb (ppm)	36	44
Dy (ppm)	216	276
Ho(ppm)	40	55
Er (ppm)	111	155
Tm (ppm)	15	21
Yb(ppm)	96	128
Lu (ppm)	12	17
Y (ppm)	1391	1883
ETR+Y	11098	10680
ETRL/ETRP	4,17	2,75
TREO (%)	1	1
Zr (ppm)	7941	6359
Hf (ppm)	256	208
Nb (ppm)	>1000	799

REFERÊNCIAS

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Informe Anual dos Projetos 1988**. Rio de Janeiro: CPRM; SUPAMI, 1988.

COSTA, E. G. **Projeto Costa Marques**: relatório da fase de prospecção preliminar, DNPM 880.092/84 a 880.095/84. Porto Velho: CPRM, 1990.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Aero-geofísico Sudoeste de Rondônia**: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Rio de Janeiro: Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas, 2010.

FREITAS, A. F.; ROMANI, S. J.; VIEIRA, A. B. **Projeto mapas metalogenéticos e de previsão de recursos minerais**: folha SD.20 - Guaporé: escala 1:1.000.000: texto e mapas. Porto Velho: CPRM, 1985. 33 p.

BETTENCOURT, J. S. et al. Três suítes magmáticas distintas na região de Costa Marques, SW de Rondônia:

resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos, SP. **Anais...** São Paulo: SGB. 2012.

PAYOLLA, B. L. et al. Litogeoquímica de rochas ígneas félsicas da região de Costa Marques, SW de Rondônia: considerações preliminares. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUIMICA, 14.; SIMPOSIO LATINO-AMERICANO DE MAPEAMENTO GEOQUIMICO, 13-18 out. 2013, Diamantina, MG. **Anais...** Diamantina, MG: SBGq, 2013.

QUADROS, M. L. E. S.; RIZZOTTO, G. J. (Org.). **Geologia e recursos minerais do Estado de Rondônia**: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado de Rondônia-escala 1:1.000.000. Porto Velho: CPRM, 2007. 116 p. Programa Geologia do Brasil

TORRES, L. C. A. et al. **Projeto Sudoeste de Rondônia**: relatório final. Porto Velho: CPRM, 1979.

WALL, F. Don't stop using rare earths. **Materials Today**, v. 15, n. 4, p. 134, 2012.

INFORME TÉCNICO N° 13

Brasília, março de 2018.

ISSN: 2448-2242

Publicação *on-line* seriada
CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
Disponível em: www.cprm.gov.br

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

SBN – Quadra 02 – Bloco H, Ed. Central Brasília, 1º andar
Brasília - DF - Brasil
CEP: 70040-904
Telefone:(61) 2108-8400
www.cprm.gov.br
contatos: seus@cprm.gov.br
evandro.klein@cprm.gov.br



Diretor de Geologia e Recursos Minerais

José Leonardo Silva Andriotti

Corpo Editorial

Evandro Luiz Klein (Editor)
Edilton José dos Santos
João Henrique Larizzatti
Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

Revisores

Luiz G. R. Pinto
Cassiano C. Castro
Marcelo E. Almeida

Normalização Bibliográfica

Nelma Fabrícia da P. Ribeiro Botelho

Editoração Eletrônica

Marcelo Henrique Borges Leão
Nelma Fabrícia da P. Ribeiro Botelho