

IDENTIFICAÇÃO GAMAESPECTROMÉTRICA DE PLACERES RUTILO-MONAZÍTICOS NEOPROTEROZÓICOS NO SUL DA FAIXA SERIDÓ, NORDESTE DO BRASIL

Sebastião Milton P. da Silva¹, Alvaro P. Crósta², Francisco J.F. Ferreira³,
Hartmut Beurlen⁴, Adalene M. Silva⁵ e Marcelo R.R. da Silva⁶

Recebido em 29 maio, 2009 / Aceito em 25 fevereiro, 2010
Received on May 29, 2009 / Accepted on February 25, 2010

ABSTRACT. Aerial gamma-ray survey data covering Neoproterozoic supracrustal sequences in the Seridó Belt were processed and analyzed together with ground gamma-ray data, air photos and geological data for lithogeophysical characterization and mapping of granitic rocks, related pegmatites fields and lithological units of Seridó Group. Interpretation was based on individual and ternary images of the three radio-elements and the eU/eTh and eTh/K ratios, and allowed the discovery of thorium anomalies associated with coarse-grained metarenites and metaconglomerates facies intercalated with quartzites of the Equador Formation. High contents of iron oxides, ilmenite, monazite, rutile, titanite and zircon were identified by ore microscopy of polished sections in the metaconglomerate's matrix. Semiquantitative scanning electron microscopy (SEM) analyses in minerals of two samples revealed up to 79.4% of ThO₂ and 87.7% of REE in monazites; up to 99.2% of TiO₂ in ilmenite and rutile and up to 1.81% of HfO₂ in zircon. Gamma-ray anomalies due to thorium were also identified in association with sediments of Cenozoic age in the region.

Keywords: gamma-ray spectrometry, remote sensing, rutile-monazite placers, Borborema Province, Seridó Belt.

RESUMO. Dados digitais de um aerolevantamento gamaespectrométrico cobrindo sequência crustal Neoproterozóica da Faixa Seridó (FSe) foram processados e analisados juntamente com medidas de gamaespectrometria terrestre, fotos aéreas e dados geológicos de campo, objetivando a caracterização e o mapeamento litogeofísico de granitos pegmatíticos e campos de pegmatitos associados, bem como de litologias e unidades litoestratigráficas do Grupo Seridó. A interpretação das imagens individuais e ternária dos canais do urânio (eU), do tório (eTh) e do potássio (K), além das razões eU/eTh e eTh/K, possibilitou a identificação de anomalias de tório associadas a metaconglomerados e metarenitos intercalados nos quartzitos da Formação Equador, constituídos de fragmentos e seixos de quartzo, muscovita e concentrações de minerais pesados, predominantemente hematita, ilmenita, monazita, rutilo, titanita e zircão. A análise semiquantitativa em grãos minerais de duas amostras dessas rochas, por microscopia de varredura eletrônica (MEV-EDS), revelou teores máximos de 79,4% de ThO₂ e 87,7% de ETR (Ce, La, Nd) em monazitas; 99,2% de TiO₂ em ilmenita e rutilo e 1,81% de HfO₂ em zircão. Também foram identificadas anomalias de tório em sedimentos de idade cenozóica na mesma região.

Palavras-chave: gamaespectrometria, sensoriamento remoto, placeres rutilo-monazíticos, Província Borborema, Faixa Seridó.

¹Laboratório de Geoprocessamento, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Campus Universitário, Lagoa Nova, Caixa Postal 1528, 59072-960 Natal, RN, Brasil. Tel.: (84) 3215-3571 ramal 2502 – E-mails: smpsilva@cchla.ufrn.br; sebastiaomilton@gmail.com

²Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campus Universitário Zeferino Vaz, Rua João Pandiá Calógeras, 51, Barão Geraldo, 13083-870 Campinas, SP, Brasil. Tel.: (19) 3521-5120; Fax: (19) 3289-1562 – E-mail: alvaro@ige.unicamp.br

³Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Centro Politécnico, Jardim das Américas, Caixa Postal 19045, 81531-980 Curitiba, PR, Brasil. Tel./Fax: (41) 3361-3132 – E-mail: francisco.ferreira@ufpr.br

⁴Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, 50740-530 Recife, PE, Brasil. E-mail: beurlen@terra.com.br

⁵Laboratório de Geofísica Aplicada, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB), 70910-900 Brasília, DF, Brasil. E-mail: adalene@unb.br

⁶Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, 50740-530 Recife, PE, Brasil. E-mail: marcelor@ufpe.br

INTRODUÇÃO

Dados gamaespectrométricos fornecem concentrações relativas e estimativas dos teores de potássio (K, em %) e dos equivalentes de urânio (eU, em ppm) e tório (eTh, em ppm), os quais ocorrem nas rochas, solos e formações superficiais.

A utilidade desse tipo de dado depende do quanto da concentração e distribuição dos radioelementos relaciona-se originalmente com diferenças litológicas, e com suas modificações por processos mineralizantes, e de quanto essa concentração tem reflexo nos dados gamaespectrométricos e pode ser detectada e espacialmente relacionada com o material-fonte (Darnley & Ford, 1987).

Fatores externos como relevo, vegetação, solos e umidade (Galbraith & Saunders, 1983; Minty, 1997; Wilford et al., 1997; Ulbricht et al., 2009), além da interferência antropogênica, como o uso de fertilizantes em solos agrícolas (Becegato & Ferreira, 2005; Becegato et al., 2008), podem alterar as concentrações e as distribuições naturais de radionuclídeos na paisagem, dificultando a interpretação e obtenção de resultados significativos.

O avanço das tecnologias de aquisição, correção e processamento de dados aerogeofísicos nas últimas três décadas introduziu importantes melhorias na qualidade radiométrica e na resolução espacial dos aerolevantamentos regionais (Kileen, 1979; Minty, 1997; IAEA, 2003).

Além disso, as ferramentas de processamento digital de imagens (Miligan & Gunn, 1997) e de análises espaciais em sistemas de informações geográficas (Anderson-Mayes, 2002; Teixeira et al., 2006), têm possibilitado recuperar informações geológicas valiosas de dados geofísicos antigos (Oliveira et al., 2001; Dantas et al., 2003), além de difundir o seu uso na pesquisa de águas subterrâneas, por exemplo dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani, Bacia do Paraná (Portela Filho et al., 2005; Ferreira et al., 2005), bem como de aquíferos fissurais em terrenos cristalinos do Nordeste brasileiro (Souza Filho, 2008).

Suas aplicações disseminam-se nas análises e mapeamentos de terrenos geológicos e no estudo das rochas em geral (Maurice & Charbonneau, 1987; Oliveira et al., 2001; Dantas et al., 2003; Ferreira et al., 2009), no estudo e prospecção de mineralizações de urânio, de petróleo, de ouro em zonas de alteração hidrotermal, de depósitos polimetálicos e do tipo cobre nos pórfiros (Bacchiogga et al., 1975; Saunders et al., 1993; Pires, 1995; Shives et al., 2000; Pascholati et al., 2003).

A Faixa Seridó (FSe), (Jardim de Sá, 1994), localizada na porção Centro-Leste da Província Borborema (Almeida et al., 1977), inclui grande parte das Províncias Pegmatítica da Borborema (Scorza, 1944), Scheelitífera do Seridó (Lima et al., 1980) e

dois Distritos Gemológicos (Moraes, 1999), além de depósitos de ferro, ouro e barita, entre outros, constituindo importante província metalogenética do Nordeste do Brasil.

Diante da diversidade mineralógica e superposição de processos mineralizantes, e considerando ainda a natureza dos dados disponíveis e os pressupostos geológicos da literatura consultada, elegeu-se como objeto de investigação geológico-geofísica a caracterização das assinaturas gamaespectrométricas de granitos pegmatíticos e campos de pegmatitos associados, além das unidades litoestratigráficas do Grupo Seridó, na porção Sul da FSe.

Desse modo, a interpretação dos dados, inicialmente focada nas rochas graníticas, possibilitou individualizar alguns corpos de granitos pegmatíticos ainda não documentados na região (Silva, 2009), e, adicionalmente, levou à descoberta de um pacote de metarenitos grossos e metaconglomerados intercalados nos quartzitos da Formação Equador, ricos em leitos com concentração de minerais pesados e exibindo teores significativos de tório e de elementos terras-raras (Ce, La, Nd).

Neste artigo são apresentados os resultados decorrentes da descoberta das referidas ocorrências de minerais pesados. Antes, porém, considerou-se relevante proceder a uma breve revisão do comportamento geoquímico do tório, a qual foi desenvolvida durante a interpretação dos resultados produzidos pelos dados gamaespectrométricos no contexto geológico e da paisagem da região da Faixa Seridó.

CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DO TÓRIO

O tório é um elemento altamente eletropositivo e com afinidade litófila, ocorrendo principalmente em óxidos, silicatos e fosfatos. Também é encontrado em vários microorganismos e em concentrações maiores em carvão, petróleo e betume, devido à sua tendência biófila (Boyle, 1982). Os dados de concentração média de tório na crosta variam entre 8 ppm e 12 ppm (Boyle, 1982; Dickson & Scott, 1997).

O conteúdo de tório nas rochas ígneas, assim como de urânio e potássio, cresce com o aumento da concentração de sílica durante a diferenciação e a cristalização magmática, muito embora ele não acompanhe as concentrações de urânio e potássio nos processos tardios de alteração hidrotermal (Galbraith & Saunders, 1983; Shives et al., 2000).

Devido ao grande raio iônico, tório e urânio não participam da formação dos minerais principais e são concentrados em minerais acessórios como monazita, allanita, xenotímio e zircão. Em minerais como monazita e zircão os teores de tório podem ser superiores a 1000 ppm (Dickson & Scott, 1997).

A concentração de tório nas rochas metamórficas é variável e geralmente reflete a composição do protólito, as condições do metamorfismo atuante e os processos secundários de alteração metassomática-hidrotermal (Durrance, 1986).

O conteúdo de tório nas rochas sedimentares também é variável. Por suas resistências ao intemperismo, monazita e zircão provenientes das rochas ígneas podem se acumular por processo mecânico e formar depósitos detríticos de areias monazíticas.

Nos solos e coberturas superficiais, o conteúdo de tório varia entre 0,1 ppm e 50 ppm, com média de 5 ppm. Em certos tipos de solos pode-se, excepcionalmente, encontrar teores acima de 200 e até 1000 ppm de tório, ou até maiores, em argilas, lateritas e bauxitas associadas a complexos carbonatíticos ou nas proximidades de pegmatitos e veios mineralizados (Boyle, 1982).

Em ampla revisão sobre o comportamento geoquímico do urânio, do tório e do potássio, Ulbricht et al. (2009) relatam que mesmo em regiões de clima tropical o tório pode comportar-se como o mais estável dos três radioelementos, devendo-se esperar que suas leituras gamaespetrométricas indiquem teores próximos dos originais da rocha fresca e, até mesmo, que ocorra algum enriquecimento nos solos e coberturas superficiais devido a possíveis acumulações de seus minerais, os quais são mais resistentes ao intemperismo. Esses autores, entretanto, chamam a atenção para as variações que podem ser introduzidas pela mobilização acentuada dos radioelementos pelos processos de alteração hidrotermal e, em especial, pelo intemperismo em regiões de climas tropicais/subtropicais e regime acentuado de chuvas, os quais provocam a lixiviação do potássio das rochas granitóides, controlam a migração do urânio e podem ainda afetar a mobilidade supergênica do tório.

Dickson & Scott (1997) analisaram por espectrometria de raios gama amostras de rochas e solos da Austrália. Os resultados de laboratório obtidos por esses autores são apresentados na Tabela 1. Nesta tabela constam os valores mínimos, máximos e o valor médio para cada tipo litológico, na qual se observa que não há diferença significativa nas concentrações de tório de rochas granitóides, gnáissicas e ardósianas analisadas. Nas rochas ígneas intermediárias, máficas e nas rochas sedimentares carbonáticas ocorre uma diminuição geral nos teores de urânio, tório e potássio em relação aos gnáisses, as ardósias e aos granitóides. Há também uma pequena diminuição na concentração média geral nos solos sobrejacentes a todas as litologias investigadas por Dickson & Scott (1997), exceto nos solos oriundos das rochas intermediárias onde ocorre um aumento de 50% nos teores de urânio e tório (Tab. 1). Em pegmatitos os teores são

da ordem de 9 ppm de tório, abaixo dos níveis encontrados nas rochas granitóides que chegam a atingir 45 ppm deste radioelemento (Tab. 1).

Os resultados mostrados na Tabela 1 revelam ainda um aspecto importante, qual seja a sobreposição dos mesmos intervalos de valores em diferentes tipos litológicos, do que decorre, na prática, uma dificuldade adicional na interpretação de dados gamaespectrométricos. Por outro lado, e por se tratar de uma característica geofísica inerente a muitas rochas e solos, ela ainda evidencia a importância do apoio de medidas terrestres, buscando realçar e propiciar a melhor discriminação gamaespectrométrica dos diferentes materiais geológicos.

ÁREA DE ESTUDO

Localização e aspectos fisiográficos

A área de estudo é delimitada pelas coordenadas 06°40'00" e 07°15'00" de latitude Sul e 36°38'00" e 37°05'00" de longitude Oeste de Greenwich, abrangendo parte da região do Seridó, Nordeste do Brasil, em trato limítrofe dos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte (Fig. 1).

Trata-se de uma região de clima quente, semi-árido, com temperaturas médias de 24°C e precipitação pluviométrica média anual em torno de 500 mm nos últimos 50 anos. O relevo é acidentado, com cotas variando de 250 m no pediplano regional a 890 m nas Serras das Queimadas, ao Norte, e do Bonfim e de Santana, ao Sul, respectivamente, das cidades de Junco do Seridó (PB) e Equador (RN) (Fig. 1). São serras geomorfologicamente estruturadas sobre antiformas e sinformas delineadas pelos quartzitos da Formação Equador. A vegetação é arbustiva, típica das espécies de caatinga. Nos cumes das Serras das Queimadas, de Santana e do Bonfim, a vegetação do tipo arbustiva-arbórea é mais densa, melhor preservada e de maior porte.

Aspectos geológicos regionais

A área de estudo (Fig. 2) está inserida na Província Borborema (Almeida et al., 1977, 1981), extremo Nordeste do Brasil, mais precisamente na porção meridional da Faixa Seridó (Jardim de Sá, 1994).

A Província Borborema (PB) é representada por um mosaico de faixas dobradas e núcleos do embasamento cristalino, subdivididos em terrenos, maciços ou faixas em função das suas características litoestruturais e geocronológicas. Sua evolução geodinâmica envolveu a acreção de diferentes unidades tectonoestratigráficas durante o evento orogênico de colagem de terrenos neoproterozóicos Pan-africanos (Santos & Brito Neves, 1984;

Tabela 1 – Concentração de radioelementos em alguns tipos de rochas e solos da Austrália.

Tipos de rochas	Rochas			Solos		
	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
Granitóides	0,3-4,5 (2,4)	0,4-7,8 (8,3)	2,3-45 (16)	0,4-3,9 (2,1)	0,5-7,8 (2,7)	2-37 (13)
Gnaisses	2,4-3,8 (2,4)	2,1-3,6 (2,5)	18-55 (15)	0,7-1,9 (1,3)	1,6-3,8 (2,2)	6-19 (12)
Pegmatitos	2,6-5,5 (3,7)	0,3-1 (0,7)	0,3-9,6 (2)	—	—	—
Aplitos	0,6-4 (2,4)	1-8 (3,3)	3-20 (2)	—	—	—
Intrusivas intermediárias	0,7-5,6 (2,7)	0,1-1,2 (0,8)	0,8-6,1 (2,4)	0,7-3,4 (1,6)	1,5-2,3 (1,9)	2,9-8,4 (5,6)
Intrusivas máficas	0,1-0,8 (0,4)	0,0-1,1 (0,3)	0,0-3,1 (1,2)			
Ardósias	0,1-4,0 (2,6)	1,6-3,8 (2,6)	10-55 (19)	0,7-3,0 (1,5)	1,2-5 (2,3)	6-19 (13)
Arenitos	0,0-5,5 (1,8)	0,7-5,1 (2,3)	4-22 (12)	0,1-2,4 (1,3)	1,2-4,4 (2,1)	7-18 (11)
Carbonatos	0,0-0,5 (0,2)	0,4-2,9 (1,6)	0-2,9 (1,4)	—	—	—

Fonte: Dickson & Scott (1997).

Jardim de Sá, 1994; Santos et al., 1999; Brito Neves et al., 2000; Van Schmus et al., 2003).

A Faixa Seridó (FSe) constitui um segmento crustal da Província Borborema, estando limitada ao Sul pelo Lineamento Patos, a Oeste pelo Maciço Rio Piranhas, a Leste pelo Maciço Caldas Brandão e ao Norte pelas coberturas meso-cenozóicas da Bacia Potiguar (Fig. 2).

A FSe é predominantemente constituída por uma sequência de rochas neoproterozóicas supracrustais, metassedimentares e metavulcânicas básicas e intermediárias subordinadas, pertencentes ao Grupo Seridó, e um embasamento Paleoproterozóico gnássico-migmatítico denominado Complexo Caicó (Fig. 2) (Jardim de Sá, 1994; Ferreira, 1997; Ferreira & Santos, 2000; Brito Neves et al., 2000; Santos et al., 2002; Angelim et al., 2004, 2006; Maia et al., 2006).

As rochas do Complexo Caicó constituem suítes de arco magmático transamazônico representadas por ortognaisses bandados félsico-máficos, ortognaisses maciços e migmatitos, com intercalações de rochas máficas e supracrustais metassedimentares com idades entre 2,3 e 2,15 Ga (Ferreira, 1997; Ferreira & Santos, 2000).

Na porção Centro-Sul da FSe, Ferreira (1997) e Angelim et al. (2004) individualizaram duas unidades litoestratigráficas distintas, quais sejam o Complexo ou Formação Serra dos Quintos (Ferreira, 1997), desmembrada da Formação Jucurutu, e a Suíte Intrusiva Várzea Alegre, desmembrada do Complexo Caicó (Angelim et al., 2004).

A Formação Serra dos Quintos é representada por biotita gnaisses, biotita-granada xistos, biotita e/ou hornblenda xistos, gnaisses quartzo-feldspáticos e BIF's, com intercalações

de mármore e de rochas ortoderivadas metamáficas e metaultramáficas. A Suíte Várzea Alegre reúne ortognaisses tonalíticos-granodioríticos e migmatitos com idade U-Pb SHRIMP de $2,19 \pm 7$ Ga (Angelim et al., 2004).

O Grupo Seridó é constituído por rochas metassedimentares de natureza plataformar marinha e turbidítica profunda (Ferreira & Santos, 2000) com metamorfismo variando do fácies xisto verde a anfibolito alto, em regime de pressões intermediárias com gradiente metamórfico aumentando de Oeste para Leste da faixa (Lima, 1987; Mello & Mello, 1974).

A unidade basal do Grupo Seridó é a Formação Jucurutu representada por paragnaisses a biotita, biotita-hornblenda gnaisses epidotíferos e rochas cálcio-silicáticas, com pequenas contribuições de rochas vulcânicas máficas, e extensivas intercalações de mármore, sugerindo um ambiente plataformar carbonático de margem passiva (Jardim de Sá & Salim, 1980; Arcanjo & Salim, 1986; Santos et al., 2002).

A Formação Jucurutu é sotoposta à Formação Equador (Jardim de Sá & Salim, 1980; Arcanjo & Salim, 1986; Angelim et al., 2006), porém essa organização litoestratigráfica é questionada por outros autores, que consideram esta última formação como a unidade representativa da sedimentação clástica plataformar da FSe sobre o embasamento Paleoproterozóico, relacionada a prováveis cordões arenosos litorâneos com recorrências sugestivas de períodos de transgressões e regressões marinhas e proveniência de material de variadas fontes (Ebert, 1970; Lima et al., 1980; Da Silva 1993; Ferreira & Santos, 2000).

A Formação Equador é constituída de quartzitos puros, micáceos ou feldspáticos, ortoquartzitos, com intercalações de metagrauvas, formações ferríferas e metaconglomerados mo-

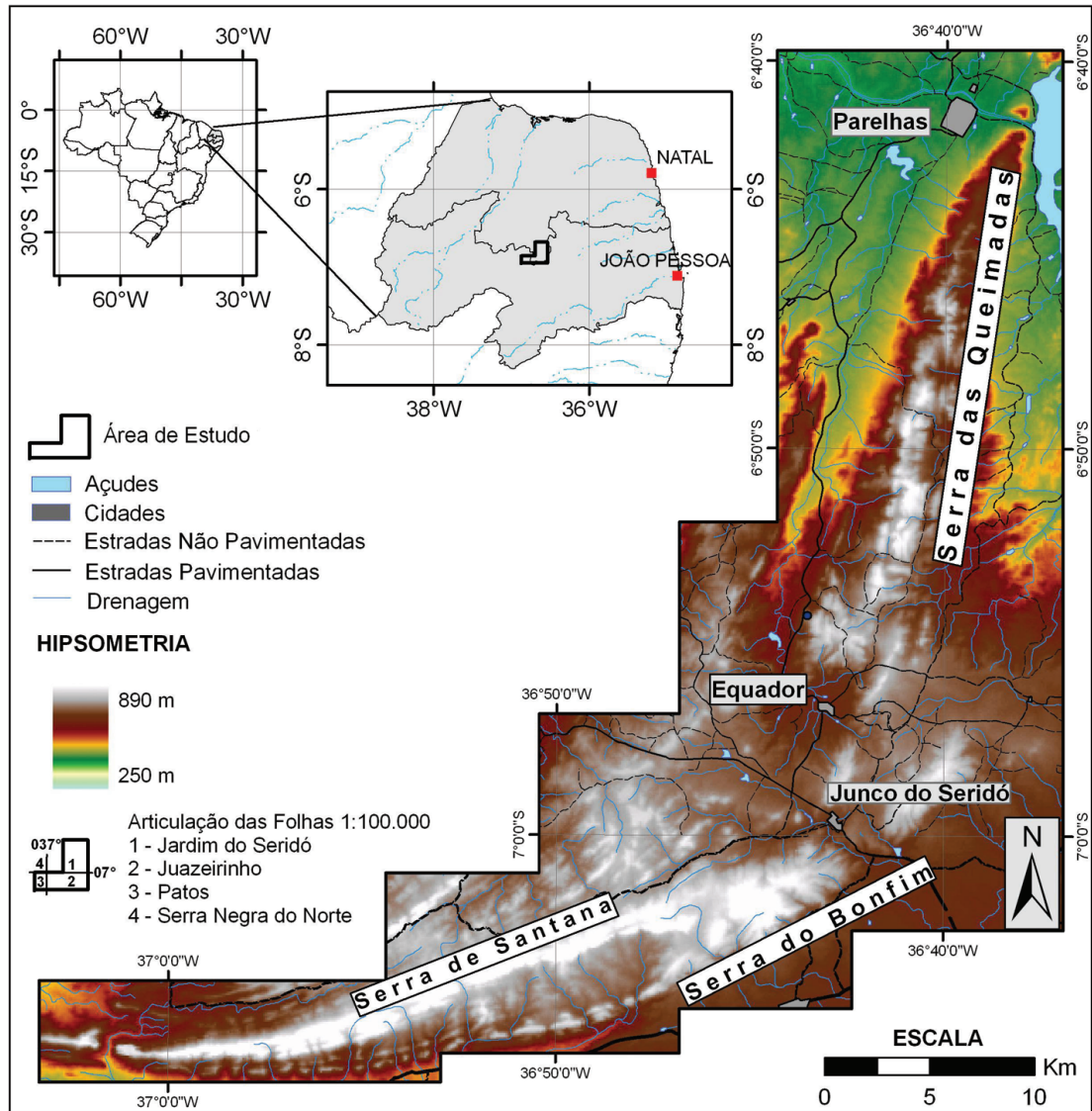


Figura 1 – Localização da área de estudo e suas principais feições de relevo, geradas a partir de dados digitais de elevação da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Rede de drenagem simplificada a partir das cartas topográficas digitais da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE, escala 1:100.000, sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Fuso 24S e datum Córrego Alegre.

nomíticos e polimíticos (Formação Parelhas de Ebert, 1970) sobre a qual repousa no topo a Formação Seridó (Lima et al., 1980; Da Silva 1993; Ferreira & Santos, 2000). Há registros de marcas de onda e estratificação cruzada em micro e meso escala nos quartzitos da Formação Equador (Arcanjo & Salim, 1986).

Arcanjo & Salim (1986) reconheceram os metaconglomerados da Formação Parelhas (Ebert, *op. cit.*) como marcadores de uma inconformidade estratigráfica da Formação Jucurutu com o Grupo Seridó e propuseram a reorganização da sequência basal em Grupo Jucurutu, envolvendo as Formações Jucurutu e Equador,

e a sequência de topo, em Grupo Seridó, englobando as Formações Parelhas e Seridó.

A Formação Seridó é predominantemente metapelítica, representada por biotita xistos com granada, cordierita e/ou sillimanita e delgadas intercalações de rochas cálcio-silicáticas, mármores e anfibolitos. No contexto evolutivo da FSe, ela representaria a fácies marinha distal da bacia, com sedimentação em depósitos de talude, alimentados por correntes de turbidez, sem mudanças composicionais significativas e características de ambientes marinhos profundos com proveniência de material que reflete a

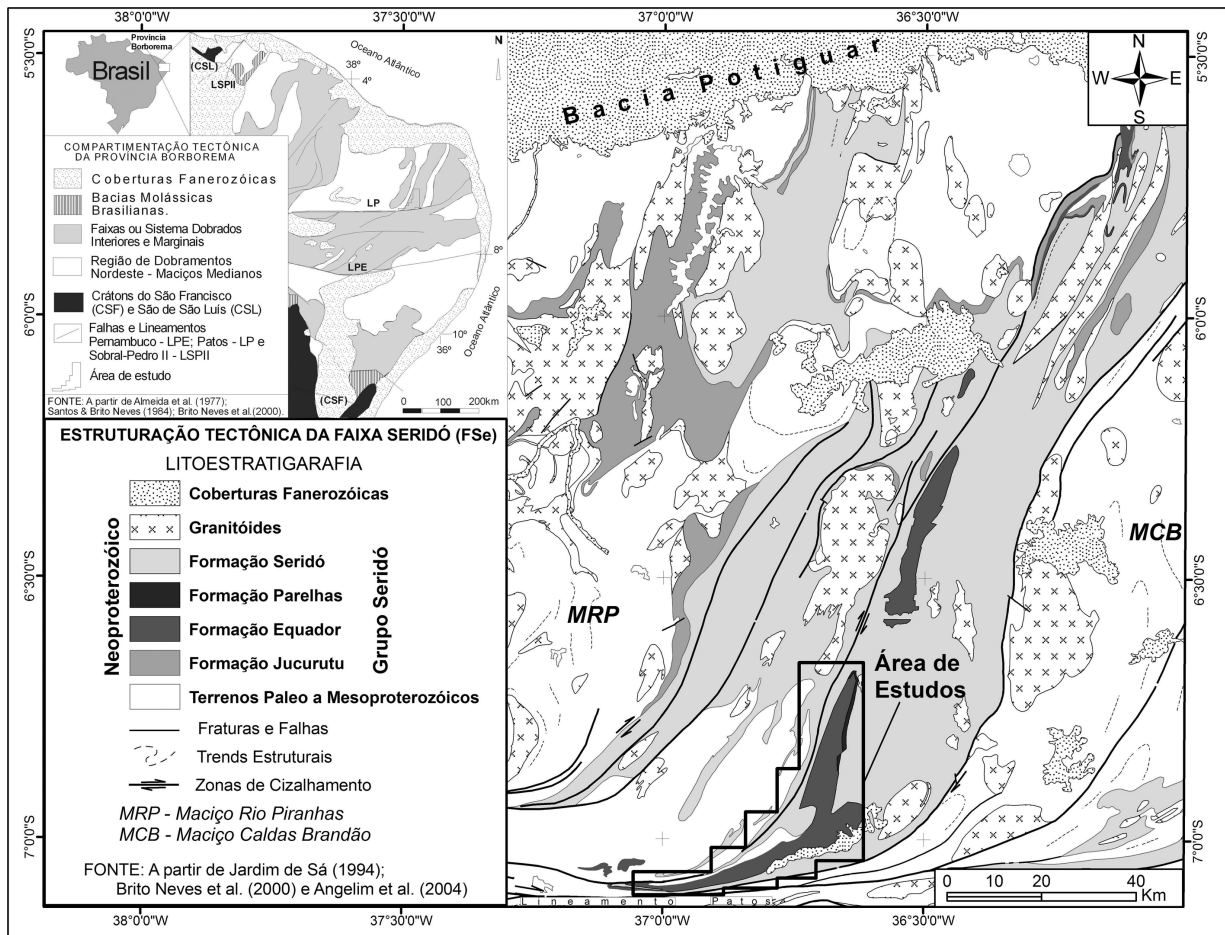


Figura 2 – Compartimentação tectônica da Província Borborema (PB) e estruturação geral da Faixa Seridó (FSe) indicando a localização da área de estudo.

composição de crosta superior (Da Silva 1993; Ferreira & Santos, 2000; Santos et al., 2002).

Van Schmus et al. (2003) obtiveram idade de 650 Ma pelo método U-Pb em zircões de metassedimentos da Formação Seridó. Como a deformação e o metamorfismo da FSe ocorreram durante o Ciclo Brasileiro (600 Ma), estes autores sugerem o intervalo de 610-650 Ma para a deposição dos sedimentos do Grupo Seridó.

Duas extensas suítes de rochas graníticas, bem como centenas de corpos de pegmatitos graníticos, são encontradas na FSe. Uma das suítes reúne granitos, monzogranitos, dioritos e granodioritos grosseiros a porfíricos calcioalcalinos de médio a alto potássio da Suíte Intrusiva Itaporanga, com idades U-Pb de 579 a 555 Ma (Angelim et al., 2004), representados no Norte da área de estudo por pequena parcela do Granito de Acari. A segunda suíte compreende corpos de dimensões variadas de leucogranitos peraluminosos grossos a porfíricos, compostos essencialmente por quartzo, feldspato, muscovita e granadas e

com padrões atípicos de elementos terras-raras (Da Silva, 1993). São rochas com idade U-Pb em monazita de 528 ± 12 Ma (Baumgartner et al., 2006), cujos representantes mais próximos na área de estudo são os granitos Galo Branco e Ponta da Serra. Enxames de pegmatitos de dimensões variadas ocorrem por toda a área, muitos deles mineralizados e produtores de minerais metálicos (Be, Sn, Ta-Nb), industriais e gemas. A datação dessas rochas revelou idades U-Pb em columbitas entre 509.5 ± 2.9 Ma e 514.9 ± 1.1 Ma (Baumgartner et al., 2006).

Em vários locais são visualizados testemunhos de sedimentos clásticos terrígenos representados por arenitos grosseiros e siltitos, localmente lateritizados, pertencentes à Formação Serra dos Martins (Angelim et al., 2004, Maia et al., 2006). Esses testemunhos constituem platôs horizontais, de dimensões variadas, encimando as superfícies topográficas em cotas superiores a 650 m. A Formação Serra dos Martins é de idade terciária (Paleógeno), (Angelim et al., 2004).

As coberturas arenosas colúvio-eluviais e aluviais qua-

ternárias encerram o quadro litoestratigráfico da região. São depósitos superficiais de areias, argilas e cascalho do Quaternário (Pleistoceno) (Angelim et al., 2004).

Na Faixa Seridó são reconhecidas uma primeira fase de deformação (F1) restrita ao embasamento e outras três fases vinculadas às rochas supracrustais (Hackspacher & Sá, 1984; Jardim de Sá, 1994). Nestas últimas, a fase mais antiga (F2) caracteriza-se por dobras fechadas, isoclinais e intrafoliais associadas a macroestruturas do tipo nappes e empurrões com vergência de Norte para Sul. A fase F3, correspondente à macroestrutura cartografada regionalmente, caracteriza-se por dobras abertas de plano axial de mergulho alto, variável em vergência, e de direção NNE-NE. A fase F4 corresponde a crenulações tardias, de fraca penetrabilidade e sem reflexos na macroestrutura regional, com *trend* NW-SE. A Faixa Seridó é ainda caracterizada por extensas zonas de cisalhamento transcorrentes de direção NNE, ora dextrais, ora sinistrais, instaladas durante a tectônica transpressiva Brasileira/Pan-Africana, que afetou a região em torno de 600 Ma (Jardim de Sá, 1994; Santos et al., 1999; Ferreira & Santos, 2000).

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados cartográficos, de elevação e geológicos

A base de dados espaciais foi construída em ambiente ARCMAP 9.3. Foram utilizadas as cartas topográficas digitais da SUDENE, escala 1:100.000, sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Fuso 24S e datum Córrego Alegre. Para a cobertura completa da área de estudo elaborou-se um mosaico a partir das Folhas Jardim do Seridó (SB-24-Z-B-V), Juazeirinho (SB-24-Z-D-II-B), Patos (SB-24-Z-D-I) e Serra Negra do Norte (SB-24-Z-B-IV), cuja articulação é mostrada na Figura 1.

Os dados altimétricos digitais utilizados são da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e foram obtidos no endereço <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov>. Esses dados foram utilizados na confecção de mosaico, que foram incorporados à base de dados do projeto e utilizados para gerar o modelo digital de elevação (MDE) e a imagem de relevo sombreado.

As fotos aéreas disponíveis, escala 1:25.000, foram digitalizadas, georreferenciadas e incorporadas à base de dados do projeto. A Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Folha SB-24 Jaguaribe (Angelim et al., 2004) e o Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte, escala 1:500.000 (Angelim et al., 2006) foram obtidos junto à CPRM/Serviço Geológico do Brasil já em formato digital (CD-ROM).

Dados gamaespectrométricos

Gamaespectrometria aérea

Os dados gamaespectrométricos são oriundos do aerolevantamento executado entre abril e agosto de 1973, pela empresa LASA S.A. para o Projeto Seridó, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM/Serviço Geológico do Brasil. Foram executados 28.000 km de perfis na direção E-W, com espaçamento de 1 km entre linhas de vôo e linhas de controle de direção N-S com intervalos de 20 km (LASA, 1974; CPRM, 1994).

Os dados do Projeto Seridó não foram retrocalibrados pelo Brazil Airborne Radiometric Mapping Project (BARMP, 1997), ou seja, as contagens por segundo (cps) não foram transformadas para concentrações (% de K e ppm de eU e eTh). O intervalo de amostragem ao longo das linhas de vôo foi de 135 m e o aerolevantamento cobriu uma área de 25.000 km², situada na porção centro-meridional dos Estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba. O gamaespectrômetro utilizado foi o modelo EXPLORANIUM DIGRS-2000 com detectores de iodeto de sódio (NaI) ativado a tálio (TI), totalizando 1.012,5 polegadas cúbicas e com tempo de integração de 2 segundos (LASA, 1974; CPRM, 1994).

Os arquivos digitais foram gerados na CPRM a partir da digitalização das linhas de vôo sobre as cartas impressas em escala 1:50.000 (CPRM, 1994, 2008).

Neste estudo, o processamento inicial dos arquivos digitais constou do recorte dos dados da área de estudo, seguido de sua reprojeção para o sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), Fuso 24S, datum Córrego Alegre.

Em seguida procedeu-se à análise dos dados, observando-se suas estatísticas (média, variância, desvio padrão) e a disposição das linhas de vôo, além da identificação de valores discrepantes e negativos que, segundo Pires (1995), se devem a problemas de correção do *background* atmosférico e/ou de calibração instrumental. Ainda de acordo com esse autor, os valores negativos podem ser removidos a partir da adição, a cada variável, de uma constante, de modo que o menor valor de cada conjunto passe a ser um valor positivo ou zero. Neste estudo foram evitadas operações envolvendo valores nulos em função de suas implicações no cálculo das razões, elevando o menor valor negativo de cada grupo de dados para um centésimo positivo (0,01%), conforme Ferreira et al. (2009).

Após essa etapa, foi feita a interpolação dos dados para geração das malhas regulares, com células de 500 m. Para tanto foi empregado o algoritmo de mínima curvatura (Briggs, 1974), prosseguindo-se com o micronivelamento (Minty, 1997; Blum, 1999) para remover alguns artefatos segundo a direção das linhas de produção.

Gamaespectrometria terrestre

A aquisição dos dados gamaespectrométricos terrestres ocorreu durante campanha de campo realizada em 2008, com emprego do gamaespectrômetro portátil GS-512 fabricado pela Geofyzika (República Tcheca), pertencente ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR. Tais dados deram suporte à interpretação aerogeofísica e aos trabalhos de campo.

O GS-512 opera com 512 canais no intervalo de 0,1 a 3 Mev e foi calibrado no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Detalhes sobre a calibração deste equipamento podem ser obtidos em Becegato & Ferreira (2005).

As medidas terrestres envolveram vários tipos de rocha, como quartzitos, granitos pegmatíticos, pegmatitos, biotita xistos, gnaisses, metaconglomerados e metarenitos. O número de medidas em cada amostra ou ponto de observação variou entre (1) uma e (5) cinco leituras, todas com tempo de integração de 3 minutos. Na discussão dos resultados são apresentados o número de leituras, o valor mínimo, o máximo e a média de cada ponto e amostra.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aerogamaespectrometria

As imagens dos radioelementos utilizadas na interpretação são apresentadas nas Figuras 3 (A e B) e 4A. A Figura 3A mostra as imagens individuais e a ternária dos canais do urânio (eU) do tório (eTh) e do potássio (K) nas cores vermelho, verde e azul, respectivamente. A Figura 3B exibe a imagem da razão eTh/K codificada em pseudo-cor. A Figura 4A mostra os resultados da razão eU/eTh também em pseudo-cor, enquanto a Figura 4B apresenta o mapa geológico obtido a partir de Angelim et al. (2006). Todas essas imagens, bem como o mapa, estão sobrepostas ao modelo digital de elevação (MDE) sombreado e têm assinaladas as ocorrências e pontos de observação e de medidas geofísicas terrestres.

A Figura 3A mostra que há diferenças no comportamento gamaespectrométrico dos quartzitos da Formação Equador, situados ao Norte e ao Sul das cidades de Junco do Seridó (PB) e de Equador (RN) (Fig. 1). Ao Norte, predominam tons avermelhados ao longo dos flancos da Serra das Queimadas, reflexo da presença de zonas enriquecidas em potássio em relação ao urânio e ao tório.

Nessa região os quartzitos são mais micáceos, com foliação proeminente e também são intrudidos por enxames de pegmatitos e corpos graníticos pegmatíticos, constituindo anomalias de K localizadas, como na região situada a Leste da cidade de Equador, onde aflora o granito pegmatítico Galo Branco (ponto SS097

– Fig. 3A). Esses granitos também são encontrados nos flancos Leste e Oeste da Serra das Queimadas, intrudindo quartzitos, biotita xistos e metaconglomerados (SS164 – Fig. 3A).

No flanco Oeste da Serra das Queimadas os paragneisses a biotita da Formação Jucurutu exibem tons avermelhados, indicando uma maior concentração de potássio (ponto SS082, Figs. 3A e 4B), consistente com seu conteúdo em biotitas e bandas félsicas ricas em muscovitas e feldspatos potássicos.

Ainda na região Norte da área de estudo, urânio e tório exibem comportamentos semelhantes e contrários ao do potássio, pois contribuem com baixos valores, representados por tons azuis fortes, como se observa nas imagens do eU e do eTh e também nas imagens das razões eTh/K e eU/eTh (Figs. 3A, 3B e 4A).

Observa-se ainda na Figura 3A, ao Sul de Equador e do Junco do Seridó, a predominância de tons esverdeados sobre os quartzitos da Formação Equador, destacando-se as anomalias de tório, em tons fortes de verde, nas Serras do Bonfim (pontos SS054 e SS105, Figs. 1, 3A e 3B) e de Santana (ponto SS165, Figs. 1, 3A e 3B), respectivamente.

A imagem da razão eTh/K (Fig. 3B), também mostra o comportamento gamaespectrométrico oposto do tório em relação ao potássio, nos quartzitos dos setores Norte e Sul da área de estudo. Baixos valores de tório, em tons azuis fortes, são rastreados por toda a extensão da Serra das Queimadas, ao Norte, e valores anômalos, em tons avermelhados, localizados na Serra do Bonfim, ao Sul (pontos SS054, SS105 e SS165, Figs. 1, 3B e 4A).

Nesses pontos (SS054, SS105 e SS165 – Figs. 1, 3B e 4A) foram identificados metaconglomerados e metarenitos, médios a grossos, intercalados em quartzitos (médios a finos) da Formação Equador, cujas concentrações elevadas de minerais pesados são responsáveis pelas anomalias aerogamaespectrométricas.

A imagem da razão eU/eTh (Fig. 4A) permite também diferenciar as litologias das regiões Norte e Sul. Assim como o potássio, o urânio, na região da Serra das Queimadas, exibe anomalias com tons avermelhados onde foram observados granitos pegmatíticos, como o granito Galo Branco (SS097 – Fig. 4A), no qual é possível observar em amostras de mão pequenos cristais (0,2 cm) de torbernita.

Ainda no mapa da razão eU/eTh (Fig. 4A), os quartzitos do Sul apresentam-se com tons esverdeados, indicando enriquecimento de tório em relação ao urânio. É interessante observar que os tratos anômalos de eTh, em tons fortes de verde, se superpõem às áreas de alta razão eTh/K, coincidindo com os locais onde foram identificadas as anomalias toríferas (SS054, SS105, SS165 – Figs. 1, 3B e 4A).

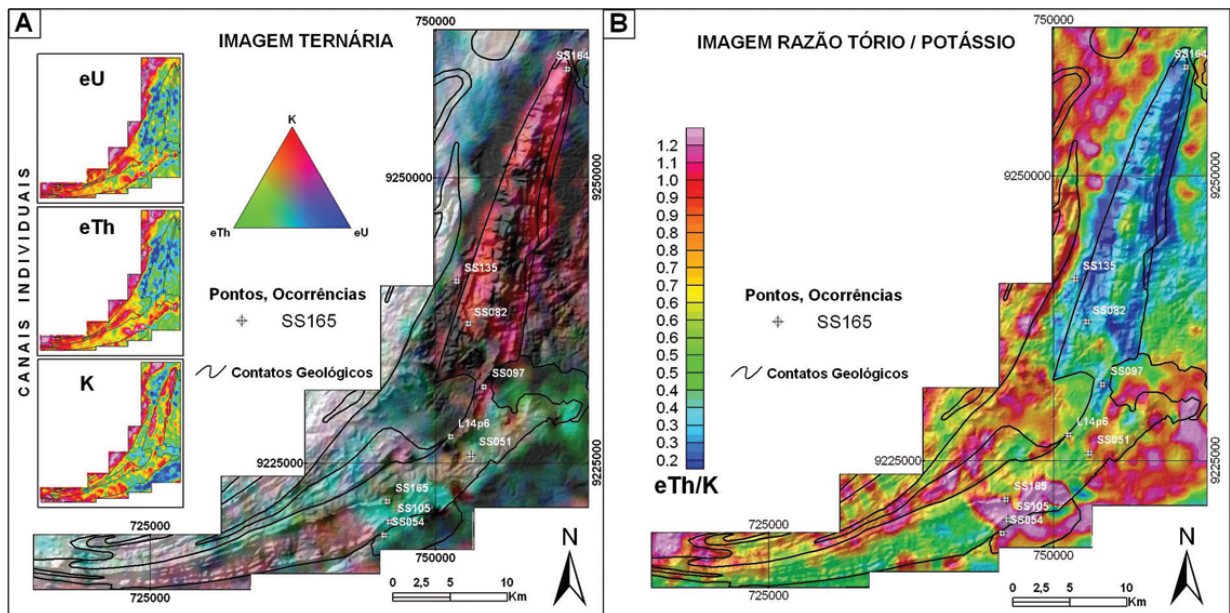


Figura 3 – Imagens do K, do eTh, do eU e ternária (A) e da razão eTh/K (B) sobrepostas ao MDE, nas quais estão assinalados os pontos de observação em campo discutidos no texto e suas respectivas siglas.

Levantamento geoquímico de sedimentos de corrente realizado pela CPRM na Folha Jardim do Seridó (SB.24-Z-B-V), escala 1:100.000 (Fig. 1) revelou a presença de várias anomalias de U e Th associadas a elementos terras-raras na região Centro-Sul dessa folha. Leite & Lins (2008) atribuíram a origem dessas anomalias a corpos graníticos encaixados no embasamento gnáissico-migmatítico.

Neste estudo, entende-se que pelo menos parte das anomalias apontadas por esses autores na região da Folha Jardim do Seridó deve se relacionar às concentrações primárias de minerais portadores de elementos terras-raras refletidas nas anomalias gamaespectrométricas identificadas nos metaconglomerados da Serra de Santana e do Bonfim. Nesse sentido, esses minerais seriam ao longo do tempo trazidos pelos cursos d'água que drenam destas serras (Fig. 1) e adentram a região abrangida pela Folha Jardim do Seridó (Fig. 1).

Outro elemento favorável a essa interpretação pode ser observado na imagem da razão eTh/K (Fig. 5). Esta imagem mapeia anomalias sobrepostas às coberturas areno-argilosas (tércio-quadernárias) e elúvio-alúvias (quadernárias), distribuídas a noroeste da Serra de Santana, no limite Sul da Folha Jardim do Seridó.

Essas anomalias são aqui interpretadas como secundárias e decorrentes da ação do ciclo exógeno ao longo do tempo, em correspondência ao relevo, o qual possibilitou a desagregação, o transporte e a deposição dos minerais pesados, removidos dos

metarenitos e metaconglomerados, em planícies e depressões intermontanas.

As anomalias de maior intensidade se relacionam às coberturas arenosas mais erodidas, onde a vegetação é escassa (Ponto 1 – Fig. 5), situação distinta do que se observa quando a cobertura é mais preservada pela vegetação (Ponto 2 – Fig. 5).

Gamaespectrometria terrestre

Na Tabela 2 são mostrados os teores de K (%), eU (ppm) e eTh (ppm) obtidos neste estudo com o gamaespectrômetro GS-512. A primeira coluna contém os nomes das unidades litoestratigráficas, as siglas dos pontos e o número de leituras, enquanto nas colunas seguintes constam os valores mínimo, máximo e as médias de cada radioelemento.

A Tabela 2 mostra que o maior intervalo de variação dos teores de eTh ocorre nos metarenitos, metaconglomerados e quartzitos da região Sul. Eles variam de 2,4 ppm nos quartzitos, a Oeste da cidade de Junco do Seridó (Ponto L14p6 – Tab. 2; Figs. 3 e 4), a mais de 360 ppm nos metaconglomerados da Serra do Bonfim (SS054 – Tab. 2; Figs. 3 e 4).

Dentre as demais litologias, o granito pegmatítico Galo Branco (SS097 – Tab.2; Figs. 3 e 4) com valor médio de 15,93 ppm de tório (Tab. 2) se equipara aos metarenitos, metaconglomerados e quartzitos da região Sul. Tal valor é compatível aos das rochas graníticas de outras regiões (Tab. 1).

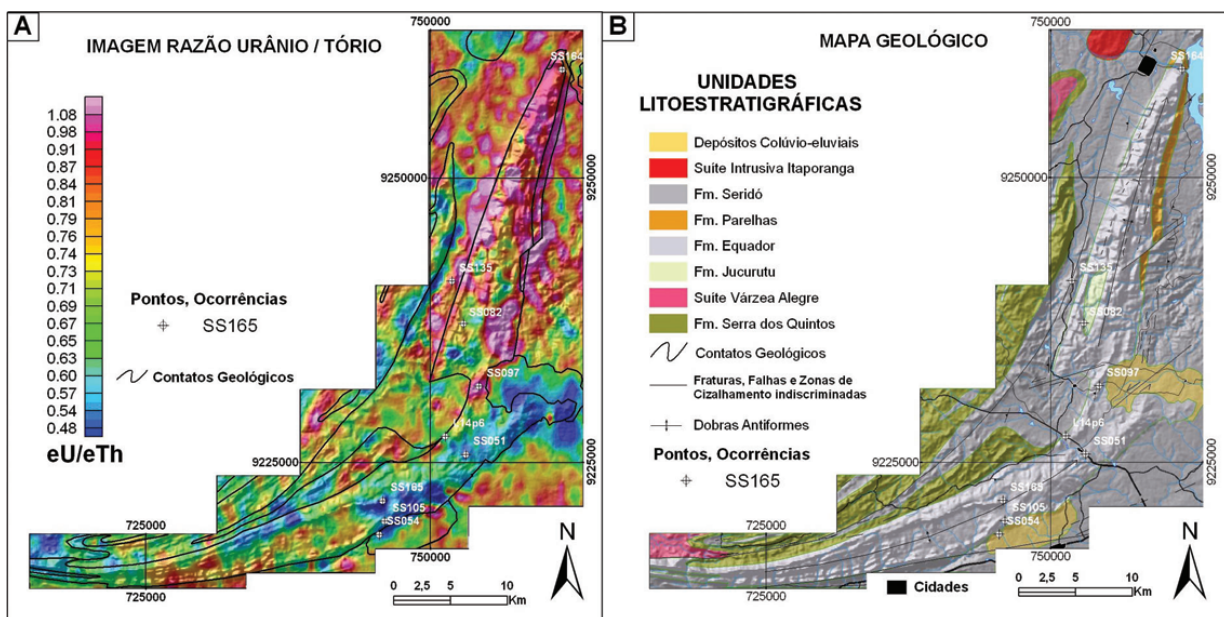


Figura 4 – Imagens da razão eU/eTh (A) e do mapa geológico da área de estudo (B), simplificado de Angelim et al. (2006), sobrepostas ao MDE. Pontos e siglas indicam locais de observações de campo.

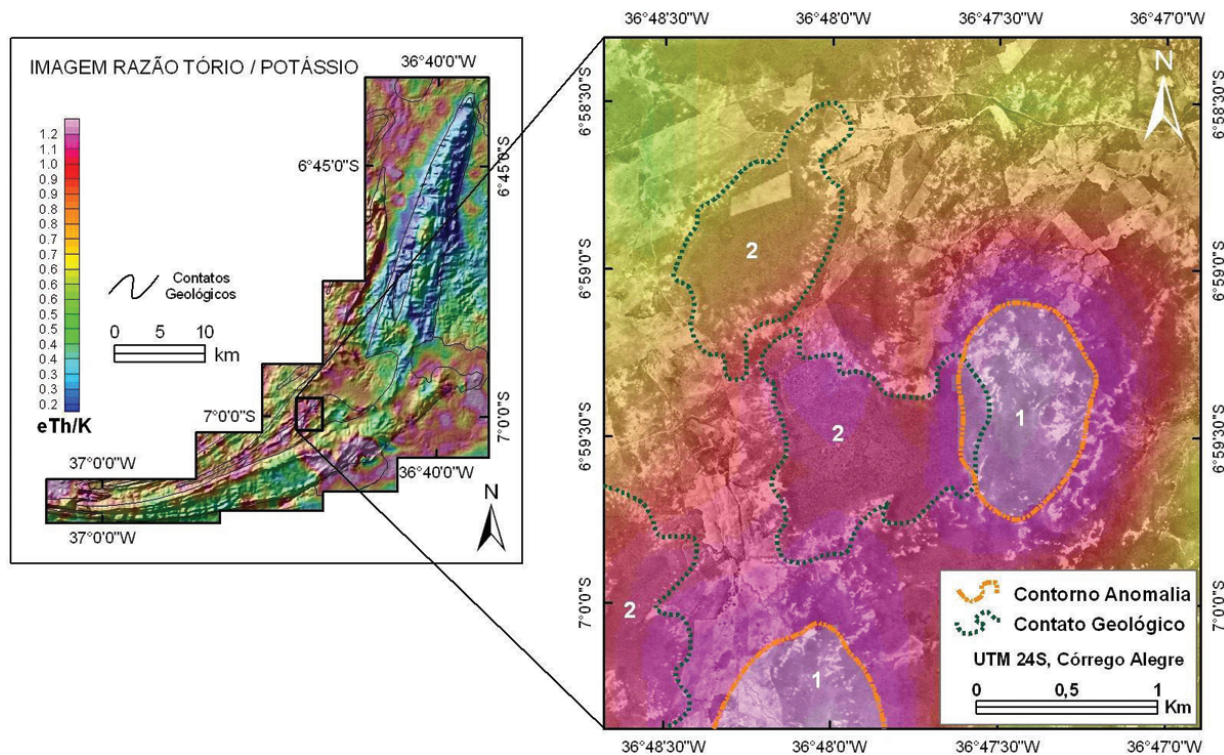


Figura 5 – Recorte da imagem da razão eTh/K sobreposto à fotografia aérea, mostrando platôs de sedimentos da Formação Serra do Martins (Terciário-Quaternário) e coberturas elúvio-colúviais (Quaternário). Ponto 1 – anomalias de maior intensidade (coberturas mais erodidas), Ponto 2 – anomalias de menor intensidade (coberturas mais preservadas).

Tabela 2 – Concentração de radioelementos em litologias da área de estudo.

Litologias (Pto. – n° medidas)	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
	Min-Máx (Média)	Min-Máx (Média)	Min-Máx (Média)
Metacongl. Fm. Jucurutu (SS082-02)	2,1-2,2 (2,15)	2,3-3,8 (3,05)	8,2-12,9 (10,6)
Quartzito Fm. Equador E (SS051-05)	2,9- 4,4 (3,5)	0,5-2,9 (1,64)	23,4- 73,1 (52,72)
Quartzito Fm. Equador W (L14p6)	0,3-4,9 (3,14)	1,2-7,4 (4,02)	2,4-26,7 (14,86)
Metaconglomerado Bonfim (SS054-03)	1,9 -2,1 (2)	10,2-35,4 (22,8)	13,2-361,5 (196,3)
Metacongl. Fm. Parelhas (SS164-04)	2,6-4,2 (3,63)	0,6-3,2 (2,08)	5,3-10,7 (8,6)
Biotita xisto Fm. Seridó (SS135-03)	2,5-3,0 (2,8)	0,5-2,1 (1,3)	6,8-8,7 (8,0)
Metarenito Bonfim (SS105-03)	3,1-3,7 (3,4)	2,2-5,6 (4,1)	24,7-31,3 (27,47)
Granitos Pegmatítico (SS097-03)	3,2-3,7 (3,4)	4-4,8 (4,43)	14,6-16,2 (15,93)
Metarenito Bonfim (SS165-01)	1,9	1	10,4

Os dados da Tabela 2 demonstram a consistência dos resultados obtidos com a gamaespectrometria aérea e terrestre. Estes últimos validam o comportamento aerogamaspectrométrico diferenciado dos quartzitos da Formação Equador, situados na porção meridional da área de estudo, devido à maior conteúdo de minerais pesados nos fácies mais arenosos e de granulometria mais grossa (Tab. 2; pto. SS165; Figs. 3 e 4), culminando com a concentração torífera nos metaconglomerados das Serras do Bonfim e de Santana (Tab. 2; pts. SS054, SS165 e SS105; Figs. 3 e 4).

Medidas gamaespectrométricas terrestres realizadas por Malanca et al. (1993), em 51 amostras de solos do Estado do Rio Grande do Norte, indicaram concentrações médias de 226Ra, 232Th e 40K de, respectivamente, 29,0 Bq/Kg, 46,6 Bq/Kg e 677,8 Bq/Kg, correspondendo, conforme fatores de conversão do IAEA (2003), a 2,34 ppm de eU, 11,47 ppm de eTh e 2,16% de K, nesta ordem. Segundo esses autores, os valores mais elevados são oriundos dos solos do Município de Santana dos Matos, o qual dista cerca de 80 km ao Norte de Parelhas, sendo localizado a Oeste dos quartzitos da Formação Equador.

Campos et al. (2008) determinaram níveis de atividade de 27,1-39,1 Bq/Kg de 226Ra, 33,74-48,5 Bq/Kg de 232Th e 260,1-234,8 Bq/Kg de 40K, correspondendo, respectivamente, a 2,1-3,1 ppm de urânio, 8,3-11,9 ppm de tório e 0,75-0,83 de K, em minerais e solos de pegmatitos em distritos mineiros entre Equador e Parelhas. Estes valores de radioatividade natural foram considerados elevados por esses autores, tendo em vista a proximidade dos pontos amostrados das fontes de abastecimento de água e do risco à saúde humana.

Os valores determinados por Campos et al. (2008) são próximos dos teores detectados neste estudo (Tab. 2). As áreas

anômalas indicadas por esses autores não foram detectadas pela gamaespectrometria aérea, talvez como decorrência da baixa resolução espacial do aerolevante disponível.

Características das ocorrências minerais

A Figura 6 mostra um recorte ampliado da imagem da razão eTh/K sobreposto a fotografia aérea com a localização dos pontos SS105, SS054 e SS165. A Figura 7 (A a D) exhibe aspectos texturais e mineralógicos das rochas encontradas nesses pontos.

O ponto SS105 (Fig. 6) está localizado a 752 m de altitude no topo da Serra do Bonfim. No local, o horizonte de metaconglomerado (Figs. 7A e 7B) ocorre intercalado a metarenitos médios a grossos (Fig. 7C). Esse horizonte mergulha de 20° a 45°/SE e tem 130 m de largura, com extensão superior a 2.000 m, estimada com base na continuidade nordeste da anomalia geofísica e em fotografias aéreas.

No ponto SS054 (Fig. 6), o metaconglomerado (Fig. 7D) também ocorre intercalado com metarenitos e mergulha 65°/SE. Ele se encontra preservado em um pequeno morro testemunho com cerca de 30 m de largura e 50 m de extensão, situado no sopé oriental da Serra do Bonfim, próximo ao contato com as coberturas arenosas elúvio-aluviais a 628 m de altitude.

No ponto SS165 (Fig. 6), situado a 793 m de altitude na Serra de Santana, os mergulhos variam de 10 a 15°/NW. Nesse local os níveis conglomeráticos são menos espessos, em correspondência a leitos de minerais pesados de pequeno porte.

Os pontos SS054 e SS105 anteriormente descritos estão inseridos no flanco Leste de uma estrutura antiformal, onde os horizontes metaconglomeráticos são mais ricos em minerais pesa-

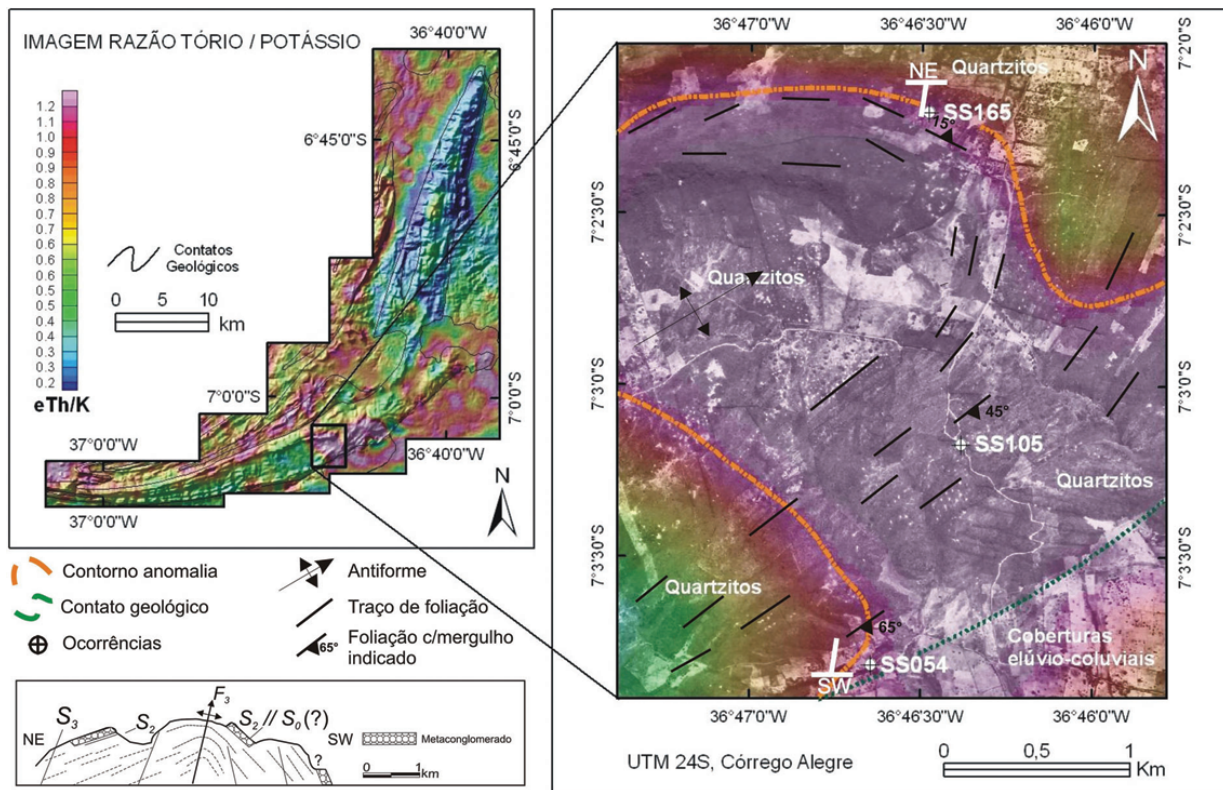


Figura 6 – Recorte ampliado da imagem da razão eTh/K sobreposto à fotografia aérea, indicando a localização dos pontos SS054, SS105, SS165, nos quais foram identificados metarenitos e metaconglomerados ricos em minerais pesados. Uma seção geológica esquemática é mostrada no canto inferior esquerdo.

dos. A julgar pelos dados de campo disponíveis, não é possível afirmar se os metaconglomerados, os quais afloram em posições topográficas e estratigráficas distintas (SS054, SS105 e SS165 – Fig. 6), correspondem a vários horizontes, ou se representam um único estrato repetido por dobramentos.

O metaconglomerado parcialmente alterado exibe coloração amarela a avermelhada, granulação grossa a conglomerática (Figs. 7A e 7D). Ele é constituído predominantemente por fragmentos angulosos e seixos de quartzo hialino, deformados e também não deformados (Fig. 7B), muscovita com dimensões de 0,1 a 0,4 cm (Fig. 7D) e minerais pesados, principalmente hematita, formando agregados alongados descontínuos ao longo do plano de foliação da rocha (Figs. 7B, 7C e 7D).

O metarenito é mais micáceo, exibindo estratificação cruzada paralela de baixo ângulo (Fig. 7C) e os leitos ricos em minerais pesados apresentam continuidade lateral e espessuras localmente superiores a 0,5 cm (Fig. 7C). Em ambas as rochas a quantidade relativa de micas varia em cada afloramento entre o metarenito e o metaconglomerado, mas sempre em menores porcentagens neste último, destacando o caráter mais arenoso dos protólitos desta rocha.

Em lâmina delgada, observa-se em quantidades muito variáveis na amostra, quartzo hialino (60 a 80%), hematita (20 a 30%), muscovita (10 a 20%), ilmenita, monazita, rutilo (1 a 3%), titanita e zircão (0 a 1%).

Sob luz refletida a lâmina polida permite identificar hematita, rutilo, monazita, zircão, ilmenita e titanita como minerais pesados. A forma isométrica dos grãos de hematita assim como o intercrescimento às vezes micromirmequítico com rutilo faz supor que a hematita é produto de recristalização metamórfica de grãos originalmente formados por magnetita titanífera. O rutilo em geral tem forma idiomórfica e transparência pronunciada, indicando reduzidos conteúdos de ferro e recristalização metamórfica. Os grãos de monazita na sua maioria são arredondados (Fig. 7E), enquanto a ilmenita é comumente lamelar, podendo-se, conseqüentemente, concluir que as texturas sedimentares originais foram quase ou completamente mascaradas, embora a paragênese monazita-rutilo-zircão-ilmenita-óxido de ferro seja típica de placeres.

Os resultados da determinação química semiquantitativa por MEV-EDS, realizada no Instituto de Geociências da Unicamp em duas amostras de metaconglomerado, revelaram teores máximos

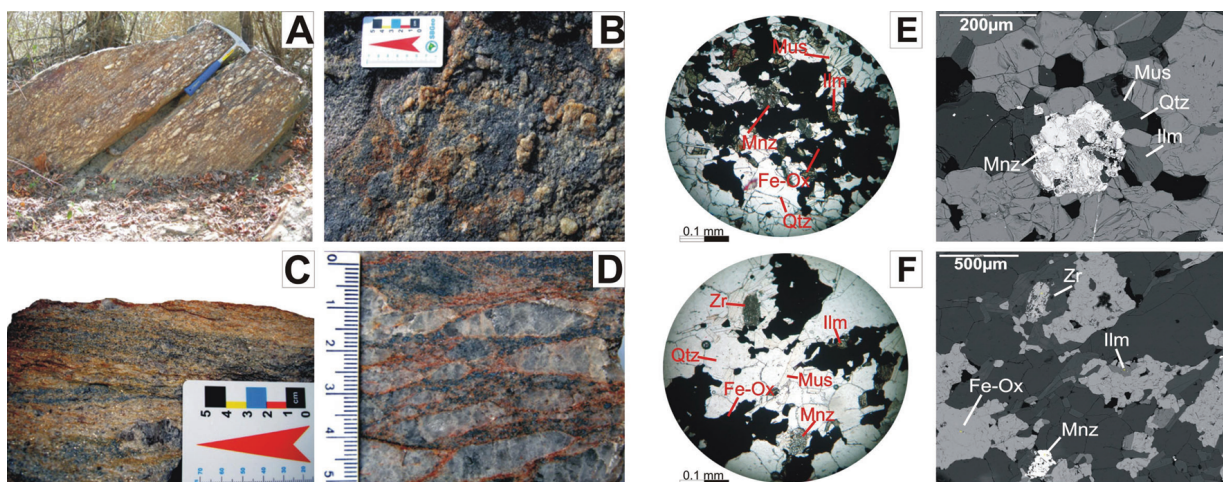


Figura 7 – (7A) Metaconglomerado da Serra do Bonfim (SS105); (7B) erosão diferencial sobre superfície S2, sub-horizontal (SS105); (7C) aspectos texturais do metarenito na Serra do Bonfim (SS105); (7D) metaconglomerado do sopé da Serra do Bonfim (SS054) e (7E e 7F) fotomicrografias do metaconglomerado da Serra do Bonfim observado sob luz paralela e imagens correspondentes obtidas por MEV-EDS, com a identificação de minerais e pontos onde foram obtidas composições químicas.

de 79,4% de ThO_2 e 88,7% de ETR (Ce, La, Nd) em monazitas (12 medidas), de 99,2% de TiO_2 em ilmenitas e rutilos (4 medidas) e de 1,81% de HfO_2 em zircão (4 medidas), incluídos nessas medidas os pontos indicados nas imagens MEV-EDS das Figuras 7E e 7F.

Finalmente, cabe ainda comentar as formas semicirculares das anomalias aerogamaespectrométricas no entorno desses pontos (Fig. 6). Como descrito, os níveis ricos em elementos terras-raras comportam-se como corpos estratiformes, quase perpendiculares à direção Leste-Oeste das linhas de vôo. Desta forma, é de se esperar que as anomalias resultantes fossem mais alongadas, acompanhando o *trend* geral NNE das estruturas regionais e dos horizontes ricos em minerais pesados. No entanto, os mergulhos predominantemente baixos das rochas, verificados no topo da serra, não só expõem, através da erosão diferencial, os sucessivos leitos ricos em minerais pesados, como também o material removido das superfícies mais elevadas. Com isso, esse material encontra-se espalhado sobre consideráveis extensões dos terrenos sucessivamente mais baixos, o que contribui para a forma semicircular das anomalias geofísicas. O espaçamento de 1 km entre as linhas de produção deve também contribuir para o espalhamento (Pires, 1995) e para a forma arredondada das anomalias.

CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo podem ser assim sumarizadas: (i) a interpretação dos dados aerogamaespectrométricos

permitiu diferenciar os quartzitos setentrionais dos meridionais na área de estudo, com base nas suas respectivas assinaturas gamaespectrométricas; (ii) as anomalias de radiação gama detectadas nos quartzitos meridionais constituem respostas, principalmente, de minerais de tório no contexto de altas concentrações de minerais pesados e de minerais portadores de elementos terras associados a metarenitos grossos e metaconglomerados intercalados nos quartzitos da Formação Equador; (iii) com base nas suas características litológicas, essas rochas foram interpretadas como paleodépósitos detriticos de antepaia (*foreshore*), a julgar pela estratificação cruzada de baixo ângulo, do baixo conteúdo em argila, da granulometria grossa e da concentração de minerais pesados, supostamente representativas de ambiente de sedimentação proximal da Bacia do Seridó, em condições paleográficas de deposição distintas dos demais metassedimentos que compõem a faixa homônima; (iv) as áreas de anomalias radioativas primárias e secundárias identificadas neste trabalho, encerram potencial para prospecção de minerais pesados e de elementos terras-raras; (v) a experiência deste estudo mostrou que a gamaespectrometria terrestre é de fundamental importância para o entendimento da dinâmica dos radionuclídeos na paisagem, em correspondência ao ciclo exógeno, desta forma contribuindo para a análise e interpretação dos dados; (vi) dos resultados obtidos decorre a proposição de um novo tipo de mineralização na Faixa Seridó, representada por minerais de elementos terras-raras contidos em placeres rutilo-monazíticos neoproterozóicos intercalados nos quartzitos da Formação Equador, na porção meridional da área de estudo; (vii) por outro lado, não obstante as

contribuições da gamaespectrometria aérea para os resultados expostos neste trabalho, destaca-se a necessidade de aerolevantamentos de maior resolução espacial como forma de ampliar o conhecimento geológico-geofísico da região e das várias províncias metalogenéticas da Faixa Seridó; (viii) a disponibilidade de tais informações, associadas à geração, análise e interpretação de produtos derivados da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e integração de dados exploratórios multifontes em sistemas de informações geográficas, irá fornecer importantes subsídios para atividades de exploração mineral na busca de novos depósitos na Faixa Seridó.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio financeiro prestado por meio do Processo 2005/05138-4, bem como aos colaboradores e revisores pelas críticas e sugestões, as quais permitiram o aprimoramento do trabalho. Também agradecem à CPRM – Serviço Geológico do Brasil pela cessão dos dados aerogeofísicos digitais. O primeiro autor agradece à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pela liberação para realização do Doutorado e à Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) pelo apoio e suporte laboratorial. A.P. Crósta, A.M. Silva, F.J.F. Ferreira e H. Beurlen agradecem ao CNPq pelas respectivas bolsas de Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FFM de, HASUI Y, BRITO NEVES BB & FUCK RA. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 8: 1977, Campina Grande. Atas... Campina Grande: SBG, 1977. p. 363–391.
- ALMEIDA FFM de, HASUI Y, BRITO NEVES BB & FUCK RA. 1981. Brazilian Structural provinces: An introduction. *Earth Science Review*, 17: 1–29.
- ANDERSON-MAYES AM. 2002. Strategies to improve information extraction from multivariate geophysical data suites. *Exploration Geophysics*, 33: 57–64.
- ANGELIM LAA, VASCONCELOS AM, GOMES JRC, WANDERLEY AA, FORGIARINI LL & MEDEIROS M de F. 2004. Folha SB-24-Jaguaribe. In: SCHOBENHAUS C, GONÇALVES JH, SANTOS JOS, ABRAM MB, LEÃO NETO R, MATOS GMM, VIDOTTI RM & RAMOS MAB (Eds.). Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, SIG. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM.
- ANGELIM LAA, MEDEIROS VC & NESI JR. 2006. Programa Geologia do Brasil – PGB. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500.000. CPRM/FAPERNA, Recife. 1 mapa color.
- ARCHANJO CJ & SALIM J. 1986. Posição estratigráfica da Formação Seridó no contexto estratigráfico regional (RN-PB). In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 12: 270–281. 1986, João Pessoa. Anais... João Pessoa-PB.
- BACCHIEGGA I, MILET F & HENRIQUE AR. 1975. Projeto Seridó I. Relatório Final. MME-CNEN-CPRM. Recife. 53 p. (inédito).
- BARMP. 1997. Brazil Airborne Radiometric Mapping Project. Technical report and survey atlas. A collaboration between Paterson, Grant & Watson Limited (PGW), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) and Geological Survey of Canada (GSC), Rio de Janeiro, RJ, 30 p. (inédito)
- BAUMGARTNER R, ROMER RL, MORITZ R, SALLET R & CHIARADIA M. 2006. Columbite-tantalite-bearing granitic pegmatites from the Seridó Belt, northeastern Brazil: genetic constraints from U-Pb dating and Pb isotopes. *Canadian Mineralogist*, 44: 69–86.
- BECEGATO VA & FERREIRA FJF. 2005. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(4): 371–405.
- BECEGATO VA, FERREIRA FJF, CABRAL JBP & RAFAELLI NETO SL. 2008. Gamma-ray spectrometry sensor and geochemical prospecting in an area of sugar cane plantation. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 51: 1–10.
- BLUM MLB. 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 229 p.
- BOYLE RW. 1982. Geochemical prospecting for uranium and thorium deposits. Amsterdam, Elsevier. 498 p.
- BRIGGS IC. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 30(1): 39–48.
- BRITO NEVES BB de, SANTOS EJ & VAN SCHMUS WR. 2000. Tectonic history of the Borborema Province northeastern Brazil. In: CORDANI UG, MILANI EJ, THOMAZ FILHO A & CAMPOS DA (Eds.). Tectonic Evolution of South America. International Geological Congress, 31: 151–182.
- CAMPOS TF da C, PETTA RA, PASTURA VFS, SANTOS RAM & SANTOS AV. 2008. A contaminação radioativa nas águas subterrâneas pela atividade garimpeira em áreas de radioatividade natural elevada e sua influência na saúde da população humana na região do Seridó, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 44: 2008. Curitiba. Anais... Curitiba-PR: 2008. p. 358.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 1994. Catálogo geral de produtos e serviços. Geologia. Levantamentos Aerogeofísicos. Base de dados AERO. 2 ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Geologia e Recursos Hídricos, 367 p.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 2008. Base de Metadados Aerogeofísicos. Catálogo de Projetos Aerogeofísicos. Rio de Janeiro: Divisão

de Geofísica – DIGEOF. Disponível em:

<<http://www.cprm.gov.br/aero/1000/aero1000.htm>>. Acesso em: 5 mar. 2008.

DA SILVA MRR. 1993. Petrographical and geochemical investigations of pegmatites in the Borborema Pegmatitic Province of Northeastern Brazil. Tese de Doutorado. Ludwig-Maximilians-Universität, München, 305 p.

DANTAS EL, SILVA AM, ALMEIDA T, MORAES RAV de. 2003. Old geophysical data applied to modern geological mapping problems: a case-study in the Seridó Belt, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(2-Suplemento): 65–72.

DARNLEY AG & FORD KL. 1987. Regional airborne gamma-ray survey: a review. In: *Proceedings of Exploration '87: Third Decennial International Conference on Geophysical and Geochemical Exploration for Minerals and Groundwater*. Geological Survey, Special, 3: 229–240.

DICKSON BL & SCOTT KM. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 187–200.

DURRANCE EM. 1986. *Radioactivity in geology. Principles and applications*. Ellis Horwood Limited. Chichester London, 440 p.

EBERT H. 1970. The Precambrian geology of the "Borborema"-Belt (States of Paraíba and Rio Grande do Norte; northeastern Brazil) and origin of its mineral provinces. *International Journal of Earth Sciences*, 59: 1292–1326.

FERREIRA CA. 1997. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Caicó. Folha SB-24-Z-B. Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Escala 1:250.000. *Geologia e metalogênese*. Brasília: CPRM, 1997. 152 p. il. 2 mapas.

FERREIRA CA & SANTOS EJ dos. 2000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe SE. Folha SC. 24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Escala 1:500.000. *Geologia e metalogênese*. Recife: CPRM, 2000. CD-ROM.

FERREIRA FJF, PORTELA FILHO CV, ROSA FILHO EF & ROSTIROLLA SP. 2005. Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani na região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná, Brasil). *Revista Latino-Americana de Hidrogeologia*, 5: 61–74.

FERREIRA FJF, FRUCHTING A, GUIMARÃES GB, ALVES LS, MARTIN VMOM & ULBRICHT HHGJ. 2009. Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. II: O Exemplo do Granito Joaquim Murtinho, Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, 9(1): 55–72.

GALBRAITH JH & SAUNDERS DF. 1983. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. *Journal of Geochemical Exploration*, 18: 49–73.

HACKSPACHER PC & SÁ JM. 1984. Critério litoestrutural para diferenciação do embasamento Caicó do Grupo Seridó, RN – Brasil. In: *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 11., 1984, Natal. Atas... Natal: SBG, p. 263–277. (Boletim do Núcleo Nordeste da SBG, 9).

IAEA. International Atomic Energy Agency. 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. IAEA-TECDOC-1363. IAEA, Viena, 173 p.

JARDIM DE SÁ EF. 1984. Geologia da região do Seridó: reavaliação de dados. In: *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 11., 1984, Natal. Atas... Natal: SBG, p. 278–296.

JARDIM DE SÁ EF. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileiro/Pan-Africana. Brasília. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 803 p.

JARDIM DE SÁ EF & SALIM J. 1980. Reavaliação dos conceitos estratigráficos na região do Seridó (RN-PB). *Mineração e Metalurgia*, Rio de Janeiro, 80(421): 16–28.

KILEEN PG. 1979. Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration – application and interpretation. In: HOOD PJ (Ed.). *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report, 31: 163–229.

LASA. 1974. Levantamento aerogeofísico – Magnetometria e Cintilometria com discriminação de energia. Projeto Seridó, Relatório Final. CPRM/DNPM/CNEN. Recife. n. Paginado (inédito).

LEITE PRB & LINS CAC. 2008. Geoquímica de sedimento de corrente da Folha Jardim do Seridó, Província Borborema, Nordeste do Brasil. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 44: Curitiba. Anais... SBG. Curitiba-PR, p. 213.

LIMA ES. 1987. Evolução termo-barométrica das rochas metapelíticas da região do Seridó, Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(3): 315–323.

LIMA EAM, TORRES AG, WANDERLEY AA, BRITO ALF, VIEIRA AT, PEREIRA ACS, MEDINA AJM, BARBOSA AJ, VASCONCELOS AM, AGUIAR CBJ, JAEGER CRS, AMARAL SA, SATO EY, SILVA EHRQ, FORTES FP, BENEVIDES HC, LEITE JF, MORAES JFS, RIGEIRO JA, NESI JR, ANGELIM LAA & CALHEIROS MEV. 1980. Projeto Scheelita do Seridó. Relatório Final. Recife: DNPM/CPRM. 1980. V. 1-5, 1284 p.

MAIA HN, LEGRAND JM, SÁ JM, De SOUZA LC, Da SILVA EBS, ROCHA TD da. 2006. Geologia da Folha Jardim do Seridó (SB.24-Z-B-V). Escala 1:100.000. Relatório técnico final. Recife: UFRN-CPRM, 2006. 155p. il. Programa Geologia do Brasil. A Retomada dos Levantamentos Geológicos Básicos. (inédito).

MALANCA A, PESSINA V & DALLARA G. 1993. Assessment of the natural radioactivity in the Brazilian State of Rio Grande do Norte. *Health Physics Society*, 65(3): 298–302.

- MAURICE YT & CHARBONNEAU BW. 1987. U and Th concentration processes in Canadian granitoids, their detection by airborne gamma ray spectrometry and their relationship to granophile mineralization. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(4): 644–646.
- MELLO AA de & MELLO ZF de. 1974. Metamorphic zoning in the Seridó region Northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 4(1): 1–14.
- MILIGAN PR & GUNN PJ. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 63–75.
- MINTY BRS. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 39–50.
- MORAES JFS de. 1999. Projeto gemas do Estado do Rio Grande do Norte. Recife: CPRM, 1999. 72 p. 1 MAPA.
- OLIVEIRA RG, SANTOS EJ, DA SILVA JR. JM & LINS CAC. 2001. Magnetic, gravity and gamma-ray spectrometry responses of tectonostratigraphic terranes in the Jaguaribe-SE sheet (SB24Z), Northeastern Brazil. In: *International Congress of Brazilian Geophysical Society, 2001 Salvador. Integration Studies: Case Histories*, 2001. p. 497–500. CD-ROM.
- PASCHOLATI EM, DA SILVA CL, COSTA SS, OSAKO LS, AMARAL G, RODRIGUEZ IP. 2003. Novas ocorrências de urânio na região de Lagoa Real, a partir da superposição de dados geofísicos, geológicos e de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(2-Suplemento): 91–98.
- PIRES ACB. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(1): 61–68.
- PORTELA FILHO CV, FERREIRA FJF, ROSA FILHO EF & ROSTIROLA SP. 2005. Compartimentação magnética-estrutural do sistema Aquífero Serra Geral e sua conectividade com o sistema Aquífero Guarani na região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná). *Revista Brasileira de Geociências*, 35(3): 369–381.
- SANTOS EJ & BRITO NEVES BB. 1984. Província Borborema. In: ALMEIDA FF & HASUI Y (Eds.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. Edgar Blucher Ltda. S. Paulo: 123–186.
- SANTOS EJ, VAN SCHMUS WR, BRITO NEVES BB, OLIVEIRA RG & MEDEIROS V. 1999. Terranes and their boundaries in the Proterozoic Borborema Province, NE Brazil. In: SBG, *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 7., Lençóis, Bahia. Anais... Lençóis/BA, SBG*. 1999. p. 121–124.
- SANTOS EJ, FERREIRA CA & DA SILVA JR. JM. 2002. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba*. Recife: CPRM, 2002. 142 p. il. 2 mapas. Escala 1:500.000.
- SAUNDERS DF, RAY BURSON K, BRANCH JF & THOMPSON CK. 1993. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics*, 58(10): 1417–1427.
- SCORZA EP. 1944. *Província Pegmatítica da Borborema (Nordeste do Brasil)*. MA, DNPM, DGM. RJ. 58 p. (Boletim 112).
- SHIVES RBK, CHARBONNEAU BW & FORD KL. 2000. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – Recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, 65(6): 2001–2011.
- SILVA SMP da. 2009. *Espectroscopia de imageamento e gamaespectrometria aérea e terrestre de pegmatitos e granitos da porção sul da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), Nordeste do Brasil*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP: 173 p.
- SOUZA FILHO OA de. 2008. *Dados aerogeofísicos e geológicos aplicados à seleção de áreas favoráveis para água subterrânea no domínio cristalino do Ceará*. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Unicamp. Campinas. 172 p.
- TEIXEIRA A de A, SILVA AM, PIRES ACB, MORAES RAV de & SOUZA FILHO CR de. 2006. Integração e Análise de dados aerogeofísicos por meio da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e classificação não supervisionada: o exemplo do *Greenstone Belt* Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(4): 559–572.
- ULBRICHT HHGJ, ULBRICHT MNC, FERREIRA FJF, ALVES LS, GUIMARÃES GB & FRUCHTING A. 2009. Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, 9(1): 33–53.
- VAN SCHMUS WR, BRITO NEVES BB, WILLIAMS IS, HACKSPACHER PC, FETTER AH, DANTAS EL. & BABINSKI M. 2003. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn- collisional basin in west Gondwana: insights from SHRIMP U-Pb detrital zircon ages and Sm-Nd crustal residence (TDM) ages. *Precambrian Research*, 127(4): 287–327.
- WILFORD JR, BIERWIRTH PN & CRAIG MA. 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 201–216.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Sebastião Milton Pinheiro da Silva. Geólogo (UFPE-1976) e Mestre em Sensoriamento Remoto e Aplicações (INPE-1991). Atuou no Serviço Geológico do Brasil – CPRM (1976-1999). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Geografia da UFRN onde leciona disciplinas de Geologia, Cartografia, Sensoriamento Remoto e SIG. Atua nas áreas de Sensoriamento Remoto, Pesquisa Mineral e Sistemas de Informações Geográficas.

Alvaro Penteado Crósta. Graduiu-se em Geologia pela USP (1977), concluiu o mestrado no Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE (1982) e o doutorado no Imperial College of Science, Technology & Medicine da University of London (1990). Realizou pós-doutorado junto ao Desert Research Institute, Universidade de Nevada, Reno, entre 1995-1996. É Professor Titular do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, e Bolsista de Produtividade em Pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/DF desde 1998. Atua na área de Sensoriamento Remoto e Exploração Mineral e de Geologia Planetária/Crateras de Impacto Meteorítico.

Francisco José Fonseca Ferreira. Geólogo (UFPE-1970), Especialista em Geofísica Aplicada (UFBA-1974), Mestre e Doutor em Ciências (USP-1982; USP-1991), Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq, com atuação profissional na CPRM (1972-1980) e no IPT (1980-1990). Atualmente é Professor Associado do Departamento de Geologia da UFPR, onde ministra disciplinas de Geofísica Aplicada nos cursos de graduação e pós-graduação. Desde 1998 coordena o Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR, onde desenvolve pesquisas multidisciplinares aplicadas ao ambiente, à exploração mineral e de águas subterrâneas.

Hartmut Beurlen. Geólogo (UFPE-1965), Doutorado no Mineralogisch Petrographisches Institut – Universität Heidelberg (Ruprecht-Karls) (1973), e Pós-Doutorado no Dept. of Earth and Space Sciences da Universidade da Califórnia (1989). Trabalhou na SUDENE (1965-1975). É Professor do curso de pós-graduação em Geociências da UFPE e Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq. É membro do corpo editorial da Revista Brasileira de Geociências e Estudos Geológicos. Trabalha com metalogenia e petrologia, com ênfase em petrografia de minerais opacos, estudo de inclusões fluidas e geoquímica, concentrando as pesquisas mais recentes na Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil.

Adalene Moreira Silva. Engenheira Geóloga (1989) graduada pela Universidade Federal de Ouro Preto, Mestre (1992) e Doutora em Geologia (1999) pela Universidade de Brasília. Atuou como pesquisadora do Serviço Geológico Americano (1997-1999), Professora Visitante da Universidade de Brasília (2000-2002), Pesquisadora (05/2002-04/2003) e Professora do Instituto de Geociências da Unicamp (04/2003-10/2005). É Professora e Coordenadora de Extensão do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília e Professora Colaboradora Voluntária do Instituto de Geociências da Unicamp. Desenvolve projetos sobre novas técnicas de processamento, interpretação e integração de dados aplicados à exploração mineral, hidrogeologia e ambiente. É Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq.

Marcelo Reis Rodrigues da Silva. Geólogo pela UFPE (1976), com Mestrado em Geociências pelo Centro de Tecnologia da UFPE (1982) e Doutorado em Geologia pela Ludwig-Maximilians-Universität München (1993). Atualmente é Professor Associado nível 1 da Universidade Federal de Pernambuco. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Metalogenia, Minerais Industriais e Geoquímica Ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: pegmatitos, mapeamento geológico e Província Pegmatítica da Borborema.