

DISTRIBUIÇÃO DE K, eU E eTh E AVALIAÇÃO DA DOSE ANUAL DE RADIAÇÃO NA REGIÃO DO GRANITO SERRA DO CARAMBEÍ – PR

Luiz C. Godoy¹, André V.L. Bittencourt², Leonardo J.C. Santos³ e Francisco J.F. Ferreira⁴

Recebido em 9 setembro, 2010 / Aceito em 4 fevereiro, 2011
Received on September 9, 2010 / Accepted on February 4, 2011

ABSTRACT. This study was conducted in an area of 14 km in length oriented in the NNE direction by 7.3 km wide, covering the totality of the Serra do Carambeí Granite and adjacent units. Located in the northern region of the Alagados dam, Paraná State, this granite contains relatively high concentrations of K, eU and eTh, known since the 1970s through airborne and terrestrial gamma-ray spectrometry surveys. Recent radiochemical tests conducted on 61 samples of geological materials such as rocks (17 samples) and material of the weathering mantle and alluvial deposits (44 samples), confirmed the occurrence of radioactive anomalies in this granite, especially in thorium and uranium. The contents of K, eU and eTh obtained in gamma-ray spectrometry survey and radiochemical tests, converted to annual radiation dose (ARD), allowed to evaluate the intensity of natural radiation, whose levels relatively high in certain regions of the study area, can offer hazard to the local populations. The analysis and interpretation of data, as well the preparation of contour maps of K, eU and eTh were fundamental to understand the behavior and mobility of radionuclides in different environmental compartments of the area.

Keywords: Serra do Carambeí Granite, gamma-ray spectrometry, radiochemical analysis, annual radiation dose.

RESUMO. O presente estudo foi desenvolvido numa área de 14 km de comprimento orientada na direção NNE, por 7,3 km de largura, abrangendo a totalidade do Granito Serra do Carambeí e unidades limitrofes. Localizado à margem norte da represa de Alagados, Estado do Paraná, este granito é portador de concentrações relativamente elevadas de K, eU e eTh, conhecidas desde a década de 1970 por meio de levantamentos gamaespectrométricos aéreo e terrestre. Ensaio radioquímico recentes efetuados em 61 amostras de materiais geológicos como rochas (17 amostras) e materiais do manto de alteração e de depósitos aluviais (44 amostras), confirmaram o caráter radioanômalo desse granito, principalmente em tório e urânio. Os teores de K, eU e eTh obtidos na gamaespectrometria e nos ensaios radioquímicos, convertidos em dose anual de radiação (DAR), permitiram avaliar a intensidade de radiação natural, cujos níveis, relativamente elevados em determinadas regiões da área de estudo, podem oferecer riscos às populações locais. A análise e interpretação dos dados e a elaboração de mapas de contorno de K, eU e eTh possibilitaram ainda entender o comportamento e a mobilidade desses radionuclídeos nos diversos compartimentos ambientais da área.

Palavras-chave: Granito Serra do Carambeí, gamaespectrometria, ensaios radioquímicos, dose anual de radiação.

¹Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Campus Uvaranas, Av. Gal. Carlos Cavalcanti, 4748, 84030-900 Ponta Grossa, PR, Brasil. Tel.: (42) 3220-3046 – E-mail: luizcgodoy@brturbo.com.br

²Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas – LPH, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Rua Estevão Bayão, 53 ap. 21, 80240-260 Curitiba, PR, Brasil. Tel.: (41) 3244-9932; E-mail: andre@ufpr.br

³Laboratório de Biogeografia e Solos – LABS, Curso de Pós-Graduação em Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Jardim das Américas, 81531-980, Curitiba, PR, Brasil. Tel.: (41) 3361-3479 – E-mail: santos@ufpr.br

⁴Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Jardim das Américas, Caixa Postal 19045, 81531-980, Curitiba, PR, Brasil. Tel.: (41) 3361-3132 – E-mail: francisco.ferreira@ufpr.br

INTRODUÇÃO

A radioatividade natural, presente em todos os ambientes da Terra, provém do decaimento de radionuclídeos encontrados em rochas e solos, da radiação cósmica e da interação desta com gases atmosféricos. No entanto, a maior parte da radiação ionizante que afeta o ser humano, cerca de 60% a 70%, (NCRP, 1987; ATSDR, 1999; Tauhata et al., 2003), origina-se da desintegração de radionuclídeos das séries do urânio (^{238}U) e do tório e (^{232}Th) e, secundariamente, do potássio (^{40}K) (UNSCEAR, 2000). Estes, por ocorrerem normalmente em baixas concentrações, geralmente não representam risco aos seres humanos.

A abundância do urânio na crosta terrestre oscila entre 2 e 3 ppm, a do tório entre 8 e 12 ppm e a do potássio entre 2 e 2,5% (Dickson & Scott, 1997; Minty, 1997; IAEA, 2003; Bonotto, 2004).

Apesar dos reduzidos teores médios, determinadas rochas, principalmente ígneas ácidas (Bonotto, 2004; Ulbrich et al., 2009), podem apresentar-se enriquecidas nestes elementos. É o caso do Granito Serra do Carambeí (GSC), aflorante à margem Norte da represa de Alagados, Estado do Paraná, que contém concentrações relativamente elevadas de urânio e tório (Pinto-Coelho, 1986; Guimarães, 2000; Guimarães et al., 2001; Ferreira et al., 2001; Riffel et al., 2001), conhecidas desde a década de 1970 por meio de levantamento aerogamaespectrométrico (Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul – PSMS; CPRM, 1978).

O objetivo principal deste trabalho consistiu na análise das concentrações de K, eU e eTh referentes aos levantamentos gamaespectrométricos aéreo e terrestre e aos ensaios radioquímicos, nos processos e condicionantes responsáveis pela dispersão desses radionuclídeos nos diversos compartimentos ambientais da área de estudo, bem como na avaliação da dose anual de radiação (DAR).

Dados gamaespectrométricos terrestres (132 estações de amostragem) e aéreos (1.184 pontos de aquisição de dados), além de ensaios radioquímicos realizados em 61 amostras de materiais geológicos coletados principalmente na área de abrangência do Granito Serra do Carambeí constituem a base da presente pesquisa.

A área de estudo situa-se no Sudeste do Estado do Paraná, na porção Oeste da bacia da represa de Alagados, entre os municípios de Carambeí, Ponta Grossa e Castro (Fig. 1). Possui formato retangular, orientado na direção NNE, com 14 km de comprimento por 7,3 km de largura, abrangendo totalmente o Granito Serra do Carambeí, além de unidades limítrofes como rochas do Complexo Granítico Cunhaporanga e da Formação Furnas (Devoniano da Bacia do Paraná), bem como depósitos inconsolidados cenozoicos (manto de alteração e depósitos aluviais). Geomorfologicamente, a maior parte da área pertence

ao Primeiro Planalto Paranaense e pequena porção, no extremo Sudoeste, ao Segundo Planalto.

GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

A geologia da região em que se localiza a área de estudo inclui unidades com idades entre o Neoproterozoico e o Juro-Cretáceo, além de coberturas inconsolidadas cenozoicas (Fig. 2), cujas características litoestruturais refletem-se na subdivisão geomorfológica regional.

O Neoproterozoico é representado pelo Complexo Granítico Cunhaporanga, ao qual pertence o Granito Serra do Carambeí (Fig. 2). Rochas do Grupo Castro, de idade eocambriana a eordoviciana, afloram a Oeste, porém, não estão presentes na área de estudo. No extremo Sudoeste ocorrem rochas da Formação Furnas, de idade eossiluriana a devoniana. Todas estas litologias são seccionadas por inúmeros diques de rochas básicas, principalmente de diabásio, pertencentes ao magmatismo Serra Geral (Mesozoico).

Complexo Granítico Cunhaporanga

O Complexo Granítico Cunhaporanga constitui um batólito de forma alongada com eixo maior na direção NE-SW que aflora da região da represa de Alagados (Ponta Grossa – PR), onde é sobreposto por arenitos da Formação Furnas no extremo SW da área de estudo.

É caracterizado por uma grande diversidade de tipos granitoides, descrita e mapeada por Guimarães (2000), como unidades litoestratigráficas informais e formais. Na área em estudo as unidades informais constituem os domínios petrográficos Serra Abaixo-Alagados (NPcsaa) e Jotuba-Pitangui (NPcjp), enquanto a unidade formal corresponde ao Granito Serra do Carambeí, representado por álcali-feldspato granitos (NPcsc₁), na porção central, envolvidos por granitoides da fácies de borda (NPcsc₂) (Fig. 2).

Domínio Serra Abaixo-Alagados (NPcsaa)

Ocorre ao Sul e a Sudeste da represa de Alagados (Fig. 2), sendo constituído predominantemente por granitoides equigranulares médios classificados como monzogranitos e, subordinadamente, granodioritos. A composição mineral inclui plagioclásio, feldspato potássico, anfíbólio, biotita e titanita como minerais essenciais, e apatita, zircão e opacos (principalmente magnetita), como minerais acessórios (Guimarães, 2000).

Domínio Jotuba-Pitangui (NPcjp)

O domínio petrográfico Jotuba-Pitangui aflora ao Norte da represa de Alagados, em contato com o Granito Serra do Carambeí,

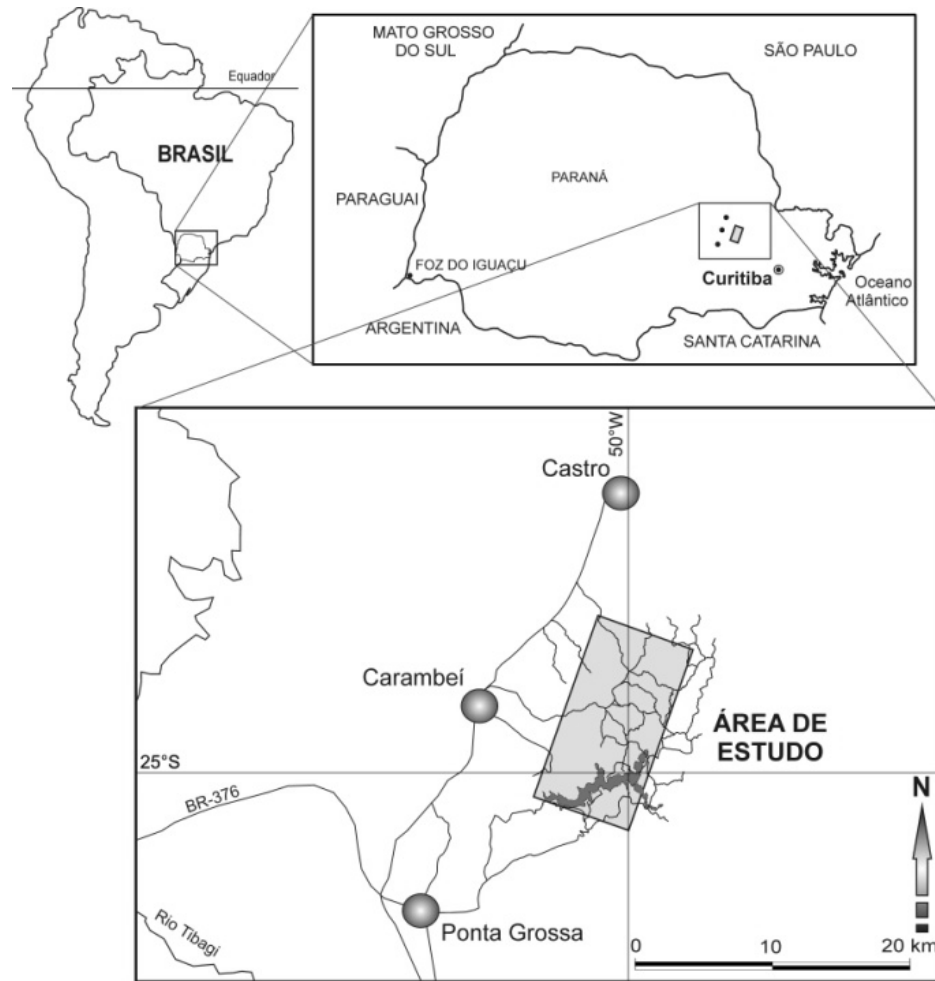


Figura 1 – Localização da área de estudo com as principais vias de acesso.

envolvendo a maior parte deste *stock* granítico. Os granitóides deste domínio, classificados como monzogranitos a granodioritos, são porfíricos a equigranulares, contendo fenocristais de feldspato potássico que ultrapassam 3 cm de aresta. A cor é acinzentada e a estrutura varia de maciça a foliada. Os principais minerais são anfibólio, feldspatos, quartzo, titanita e allanita (Guimarães, 2000).

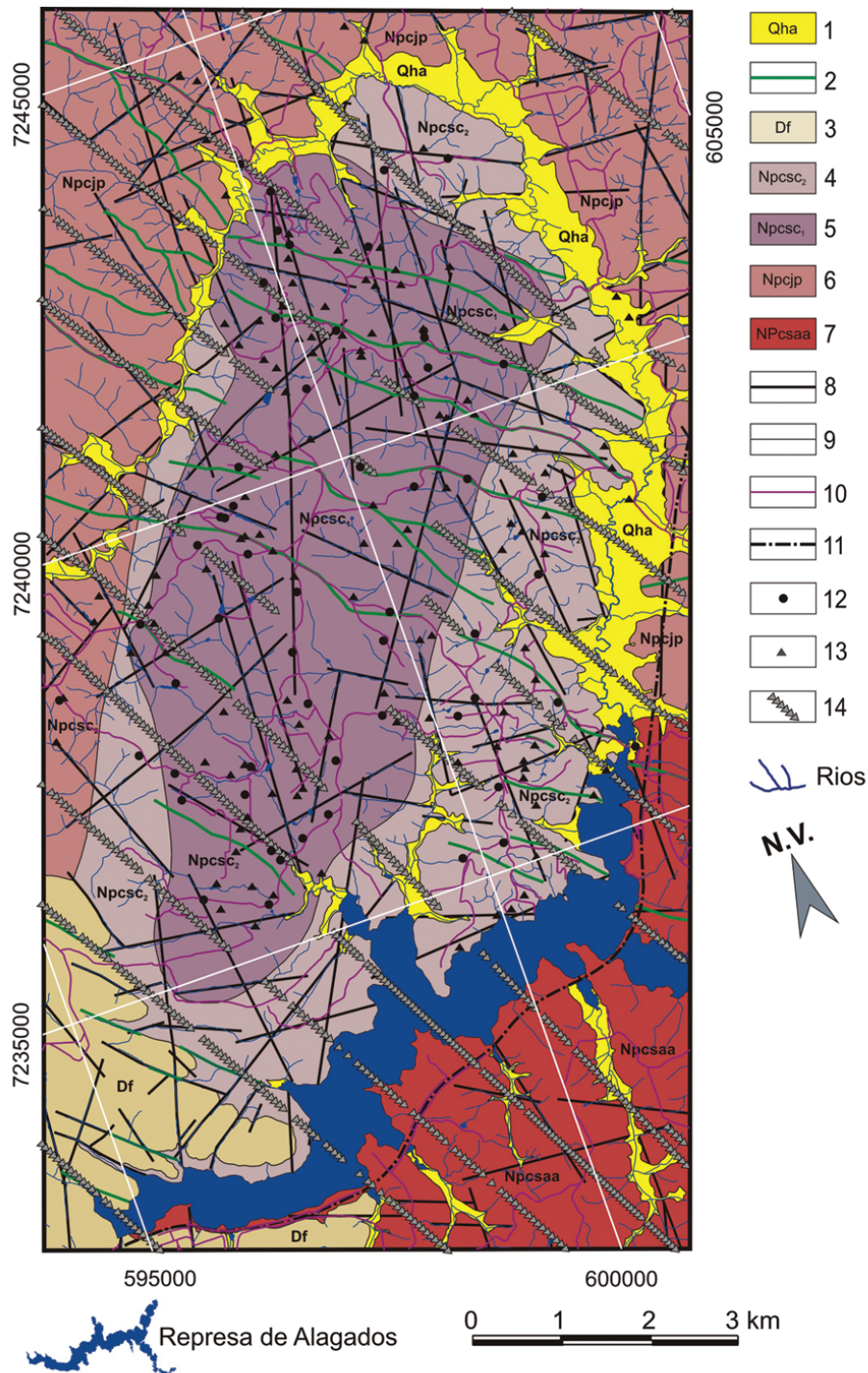
Granito Serra do Carambeí (GSC)

O Granito Serra do Carambeí aflora à margem Norte da represa de Alagados, quase integralmente no município de Carambeí – PR. Constitui um corpo relativamente homogêneo, de formato elíptico, com eixo maior na direção aproximada N30E, aflorante no extremo Sudoeste do Complexo Granítico Cunha-poranga (Fig. 2). Estudos detalhados efetuados por Guimarães (2000) sugerem a existência de uma fácies de borda no Granito

Serra do Carambeí, algo distinta dos “alasitas” característicos da unidade.

A porção central deste granito, tipicamente alásquica, corresponde a álcali-feldspato granitos – NPcsc₁ (Fig. 2), onde foram constatadas as maiores concentrações de K, eU e eTh. De cor rósea a acinzentada quando fresca, essa rocha possui textura equigranular fina a grossa e conteúdo mineral constituído principalmente por feldspato potássico e quartzo, além de minerais acessórios como biotita, hematita, fluorita e zircão.

A fácies de borda (NPcsc₂), envolvente dos álcali-feldspato granitos (Fig. 2), é constituída de granitóides de textura heterogênea, incluindo equigranular média a grossa e porfírica de matriz fina. São rochas em geral muito alteradas, de cor variando de acinzentada a marrom-esverdeada. Como principais minerais são encontrados feldspato potássico, plagioclásio e quartzo, tendo como acessórios biotita, fluorita e apatita (Guimarães, 2000).



1) Depósitos aluviais quaternários; 2) Diques; 3) Formação Furnas; 4) Granito Serra do Carambeí (GSC) - Fácies de borda (Npcsc₂); 5) CSC - Álcali-feldspato granitos (Npcsc₁); 6) Complexo Granítico Cunhaporanga (CGC) - Domínio Jotuba-Pitangui (Npcjp); 7) CGC - Domínio Serra Abaixo-Alagados (Npcsa); 8) Falhas/fraturas; 9) Contato geológico; 10) Estradas; 11) Ferrovia; 12) Amostragem de rochas, manto de alteração e aluviões; 13) Estações gamaespectrométricas terrestres; 14) Linhas de voo - aerogamaespectrometria.

Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo indicando a localização das estações de amostragem e de aquisição de dados gamaespectrométricos (modificado de Guimarães, 2000; MINEROPAR, 2006 a,b).

Formação Furnas

A Formação Furnas, base do Grupo Paraná, correspondente à unidade aloestratigráfica Supersequência Paraná (Milani et al., 2007), ocorre no extremo Sudoeste da área de pesquisa (Fig. 2). É essencialmente quartzosa, formada de arenitos de cor clara (branca, amarelada, acinzentada ou arroxeadada), com grãos subangulosos a subarredondados, regularmente selecionados e com matriz caulínica, contendo pequena quantidade de grãos de feldspato caulinizados. Sua idade é considerada como neossiluriana a eodevoniana (Assine, 1996; Bergamaschi, 1999).

Afloramentos pertencentes à sequência basal da Formação Furnas são encontrados às margens da represa de Alagados, onde, além de camadas conglomeráticas, típicas desta porção da formação, ocorrem níveis pelíticos finos de cor cinza, com menos de 10 cm de espessura, intercalados nos arenitos médios a grossos. Verifica-se ainda o contato desta formação com rochas intemperizadas do embasamento Proterozoico (Granito Serra do Carambei), correspondente, provavelmente, à superfície de erosão denominada Superfície Pré-devoniana (Ab'saber et al., 1961; Bigarella, 2003).

Rochas intrusivas básicas a intermediárias

As litologias regionais anteriormente referidas são seccionadas por inúmeras intrusões, principalmente de rochas básicas (diabásio), pertencentes ao magmatismo Serra Geral – Supersequência III (Milani et al., 2007). Ocorrem na forma de diques com idades entre $134,1 \pm 1,3$ Ma e $130,5 \pm 2,8$ Ma (Turner et al., 1994).

A grande incidência de diques (Fig. 2) é justificada pela sua proximidade com o eixo do Arco de Ponta Grossa, ou seja, localizados ao longo da faixa de maior inflexão do arco, de sorte que os diques de rochas básicas encontram-se intrudidos nas fraturas distensivas de direção geral NW-SE, originadas por tal arqueamento. As espessuras dos diques variam de submétricas a decamétricas. Em geral apresentam cor cinza escura à preta, devido à abundância de minerais ferromagnesianos, e granulação milimétrica a submilimétrica.

Coberturas cenozoicas

As coberturas cenozoicas (Fig. 2) incluem depósitos eluviais, coluviais e aluviais, cujas composições variam de acordo com os tipos litológicos aos quais estão relacionados, bem como em função das características climáticas, tectônicas, geomorfológicas, hidrográficas, dentre outras, atuantes em épocas atuais e pré-atuais.

Como a região apresenta litologias variadas (granitos, efusivas ácidas a intermediárias, intrusivas básicas e rochas sedi-

mentares arenosas), tais depósitos apresentam texturas arenosas, argilosas a síltico-argilosas e cores avermelhadas, róseas, acastanhadas e acinzentadas. Devido aos fatores morfoclimáticos regionais, as espessuras desses depósitos são muito variáveis, chegando a atingir, em certos locais, mais de uma dezena de metros.

MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização aerogamaespectrométrica foi efetuada a partir de dados do Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul – PSMS (CPRM, 1978; Silva & Mantovani, 1994; BARMP, 1997; Guimarães, 2000; Guimarães et al., 2001). Os dados aerogamaespectrométricos (PSMS), 1.184 pontos dispostos ao longo de 81.700 m de linhas de voo posicionadas na direção N30W (Fig. 2), após reprocessamento por BARMP (1997), foram transformados de contagens por segundo (cps) para concentrações de K (%), eU (ppm), eTh (ppm) e contagem total (CT, μ R/h).

Os estudos gamaespectrométricos terrestres foram efetuados com base nos dados de 132 estações de amostragem (Fig. 2), cedidos pelo Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR, espaçados de 250 a 500 m (Ferreira et al., 2001) e coletados por um gamaespectrômetro portátil (GS-512, de 512 canais), fabricação Scintrex/Geofyzika.

Trabalhos de campo realizados em diversas etapas permitiram a execução de mapeamento geológico de detalhe e a obtenção de 61 amostras de materiais geológicos, das quais, 17 de rochas e 44 de materiais do manto de alteração e de depósitos aluviais, coletadas ao longo de toda a área de ocorrência do Granito Serra do Carambei.

Com a finalidade de correlacionar as concentrações de radionuclídeos destas amostras com dados de gamaespectrometria aérea e terrestre, e tendo-se em conta que a radiação gama emitida pelo ^{40}K e pelos radionuclídeos pertencentes às séries de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th atravessa no máximo 30 cm de solos e rochas (Minty, 1997), a amostragem foi efetuada até uma profundidade de 25 cm (CPRM, 2003). Estas amostras foram submetidas a ensaios radioquímicos pelo método de análise por ativação neutrônica (AAN) no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), para a determinação das concentrações dos radionuclídeos ^{238}U (ppm) e ^{232}Th (ppm) e K (%).

Considerando que a abundância de ^{40}K na natureza é fixa e equivalente a 0,0118% de todo o potássio (Howard, 1963), o fluxo de radiação gama com energia de 1,460 MeV emitido pelo isótopo ^{40}K , ao decair para ^{40}Ar , é usado para estimar o total de potássio presente no ambiente (Gunn et al., 1997).

Quanto ao tório e ao urânio, radioisótopos não emissores de radiação gama, suas concentrações são determinadas indiretamente pela medição da radiação gama emitida por nuclídeos radiogênicos (filhos) pertencentes às respectivas séries de decaimento. A concentração de urânio é estimada pela detecção da radiação gama com energia de 1,765 MeV emitida pelo bismuto (^{214}Bi) e a de tório (^{232}Th) pela detecção da radiação gama com energia de 2,615 MeV emitida pelo tálio (^{208}Tl) (Ketcham, 1996; Minty, 1997; IAEA, 2003). Por se tratarem de estimativas indiretas, as concentrações desses radioisótopos, que podem apresentar desequilíbrio radioativo, expressas em parte por milhão (ppm), são denominadas, respectivamente, equivalente de tório (eTh) e equivalente de urânio (eU). A dose anual de radiação (DAR), denominada Sievert (Sv), tem como unidade no Sistema Internacional o Joule por quilograma (J/kg).

Os dados obtidos, além de serem utilizados em cálculos estatísticos, permitiram a construção de mapas de contorno dos diversos radionuclídeos e da dose anual de radiação (DAR) incidente na área de estudo que, sobrepostos ao modelo digital de elevação, possibilitaram entender os processos de migração dos radionuclídeos na paisagem.

Para o cálculo da DAR a que a população local (indivíduo do público) está exposta, foram utilizadas as concentrações de K, eTh e eU obtidas nos levantamentos gamaespectrométricos terrestre e aéreo e nos ensaios radioquímicos, visto que o K e os radionuclídeos originados pelo decaimento do tório e do urânio representam as principais fontes de radiação gama que afetam os seres humanos (NCRP, 1987; ATSDR, 1999; UNSCEAR, 2000; Tauhata et al., 2003). Tais radionuclídeos, presentes nas rochas e respectivos produtos de alteração, produzem um campo de radiação gama que atravessa a interface rocha/solo – ar, expondo os seres humanos e outros componentes da biota local aos efeitos danosos da radiação.

Portanto, a aplicação das concentrações dos radionuclídeos em estudo na Equação (1), de Grasty et al. (1984), permitiu a quantificação da DAR, expressa em $\mu\text{Sv/ano}$:

$$\text{DAR} = 320 + 52,56 \times [(\text{K} \times 1,505) + (\text{eU} \times 0,625) + (\text{eTh} \times 0,310)] \quad (1)$$

onde K, eU e eTh são as concentrações de potássio (%), de urânio (ppm) e de tório (ppm), respectivamente.

De acordo com órgãos reguladores (nacionais e internacionais), a exposição normal de indivíduos do público, ou seja, de indivíduos não expostos ocupacionalmente, deve ser restringida de tal forma que a dose efetiva (de corpo inteiro), seja limitada a 1.000 $\mu\text{Sv/ano}$ ou 1 mSv/ano (ICRP, 1990; 2005; CNEN, 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo em conta o número relativamente elevado de dados que, se integralmente relacionados numa tabela seria de difícil compreensão e destituídos de visão de conjunto, procedeu-se sua organização em intervalos de classes com base no critério de Sturges (Maranhão, 1985; Guerra, 1988).

Portanto, os dados das 132 estações gamaespectrométricas terrestres foram distribuídos em 8 classes de frequência (Tab. 1). Já os 1.184 pontos da aerogamaespectrometria foram divididos em 11 classes (Tab. 2), enquanto os radioquímicos (61 amostras) foram organizados em sete classes (Tab. 3).

Potássio (K)

As concentrações de K (%) obtidas nas 132 estações terrestres variaram de 0,00% a 6,10%, com média de 1,35% (Tab. 1). Valores inferiores a 1,53% são predominantes em 92 estações (69,7%). Dentre os radionuclídeos analisados, o potássio foi o que apresentou o maior coeficiente de dispersão ($C_d = 125,28\%$), indicando uma distribuição muito irregular, de acordo com a classificação proposta por Maranhão (1985).

As maiores concentrações de K ocorrem nos álcali-feldspato granitos, onde foram implantadas 81 estações de amostragem (Fig. 2). Neste compartimento lítico, onde a concentração média foi de 1,70%, ocorre à maior concentração absoluta de K (6,10%), enquanto a menor média (0,74%) foi verificada na fácies de borda, onde foram realizadas 33 medições.

O mapa de contorno do potássio sobreposto ao modelo digital de elevação (Fig. 3A) mostra baixos teores em domínio do Granito Serra do Carambei, como decorrência de sua depleção pelo intemperismo. Verifica-se, entretanto, que as maiores concentrações de K estão localizadas em meia-encostas e em fundos de vales, com aumento gradativo nos teores, das regiões de cotas mais elevadas para as de menores altitudes. Isso indica tanto a lixiviação do potássio do manto de intemperismo que capeia os topos de morros, devido à sua grande reatividade, quanto à remoção mecânica (erosiva) de parte do perfil de alteração que encobre as encostas, face à maior suscetibilidade aos processos erosivos verificada nos tratos de declividade mais acentuada. Assim, o material intemperizado, removido das regiões mais elevadas, seria temporariamente acumulado nas porções mais inferiores das encostas, bem como nos fundos de vales próximos da região erodida (área fonte), o que poderia explicar as concentrações relativamente elevadas de K registradas nestes locais.

A aerogamaespectrometria (Tab. 2) revelou concentrações de K significativamente menores que as da gamaespectrometria ter-

Tabela 1 – Distribuição de frequência das concentrações de radionuclídeos e da dose anual de radiação (DAR) referentes à gamaespectrometria terrestre na área de estudo (Conc.: concentração; Coef. disp.: coeficiente de dispersão).

Classes	K		eU		eTh		DAR	
	Conc. (%)	Freq.	Conc. (ppm)	Freq.	Conc. (ppm)	Freq.	$\mu\text{Sv/ano}$	Freq.
1	0,00–0,76	80	0,60–2,92	18	2,40–12,38	9	466,43–694,80	8
2	0,76–1,53	12	2,92–5,25	52	12,38–22,35	31	694,80–923,97	33
3	1,53–2,29	1	5,25–7,57	28	22,35–32,32	29	923,97–1151,53	29
4	2,29–3,05	8	7,57–9,90	14	32,32–42,30	27	1151,53–1379,90	26
5	3,05–3,81	14	9,90–12,22	8	42,30–52,27	18	1379,90–1608,27	19
6	3,81–4,58	10	12,22–14,55	2	52,27–62,25	9	1608,27–1836,63	6
7	4,58–5,34	4	14,55–16,88	6	62,25–72,23	6	1836,63–2065,00	8
8	5,34–6,10	3	16,88–19,20	4	72,23–82,20	3	2065,00–2293,37	3
Total de estações		132		132		132		132
Conc. Máxima	6,10		19,20		82,20		2293,37	
Conc. Média	1,35		6,23		33,27		1173,77	
Conc. Mínima	0,00		0,60		2,40		466,43	
Desvio-padrão	1,69		3,85		16,53		389,48	
Coef. disp. (Cd)	125,28		61,85		48,69		33,18	

Tabela 2 – Distribuição de frequência das concentrações de radionuclídeos e da dose anual de radiação (DAR) referentes à aerogamaespectrometria na área de estudo (Conc.: concentração; Coef. disp.: coeficiente de dispersão).

Classes	K		eU		eTh		DAR	
	Conc. (%)	Freq.	Conc. (ppm)	Freq.	Conc. (ppm)	Freq.	$\mu\text{Sv/ano}$	Freq.
1	0,00–0,16	132	0,09–1,21	42	3,14–10,02	67	403,16–551,00	57
2	0,16–0,32	247	1,21–2,34	77	10,02–16,90	438	551,00–698,84	199
3	0,32–0,47	305	2,34–3,46	502	16,90–23,79	417	698,84–846,68	608
4	0,47–0,63	188	3,46–4,58	352	23,79–30,67	112	846,68–994,52	145
5	0,63–0,79	127	4,58–5,71	78	30,67–37,55	65	994,52–1142,36	80
6	0,79–0,95	81	5,71–6,83	57	37,55–44,43	40	1142,36–1290,20	48
7	0,95–1,11	29	6,83–7,96	44	44,43–51,31	19	1290,20–1438,03	19
8	1,11–1,27	37	7,96–9,08	13	51,31–58,19	6	1438,03–1585,87	10
9	1,27–1,42	22	9,08–10,20	7	58,19–65,08	6	1585,87–1733,71	6
10	1,42–1,58	9	10,20–11,33	4	65,08–71,96	5	1733,71–1881,55	5
11	1,58–1,74	7	11,33–12,45	8	71,96–78,84	6	1881,55–2029,39	7
Total de estações		1184		1184		1184		1184
Conc. Máxima	1,74		12,45		78,84		2029,39	
Conc. Média	0,49		3,74		20,59		817,18	
Conc. Mínima	0,00		0,09		3,14		403,16	
Desvio-padrão	0,32		1,68		10,40		219,02	
Coef. disp. (Cd)	65,15		44,77		50,51		26,80	

restre e dos ensaios radioquímicos (Fig. 4A). Conforme se verifica nas Tabelas 1, 2 e 3, o teor máximo de potássio do levantamento aéreo foi de apenas 28,5% da maior concentração dos dados terrestres e de 34% da obtida nos ensaios radioquímicos.

Tal fato pode estar relacionado a incorreções na fase de aquisição dos dados, conforme relatado por Silva & Mantovani (1994), as quais parecem que não foram totalmente sanadas pelo processo de retrocalibração realizado por BARMP (1997).

Tabela 3 – Distribuição de frequência das concentrações de radionuclídeos e da dose anual de radiação (DAR) referentes a 61 ensaios radioquímicos realizados em amostras coletadas na área de estudo (Conc.: concentração; Coef. disp.: coeficiente de dispersão).

Classes	K		²³⁸ U		²³² Th		DAR	
	Conc. (%)	Freq.	Conc. (ppm)	Freq.	Conc. (ppm)	Freq.	μSv/ano	Freq.
1	<0,005–0,73	46	<0,50–2,25	14	1,10–13,09	5	354,92–605,68	6
2	0,73–1,46	0	2,25–4,38	14	13,09–25,07	22	605,68–856,45	13
3	1,46–2,19	0	4,38–6,50	20	25,07–37,06	20	856,45–1107,21	19
4	2,19–2,91	2	6,50–8,63	6	37,06–49,04	11	1107,21–1357,98	13
5	2,91–3,64	5	8,63–10,75	5	49,04–61,03	1	1357,98–1608,75	8
6	3,64–4,37	6	10,75–12,88	1	61,03–73,01	0	1608,75–1859,51	0
7	4,37–5,10	2	12,88–15,00	1	73,01–85,00	2	1859,51–2110,28	2
Total de ensaios		61		61		61		61
Conc. Máxima	5,10		15,00		85,00		2110,276	
Conc. Média	1,04		4,52		29,51		1031,189	
Conc. Mínima	<0,005		<0,05		1,10		354,918	
Desvio-padrão	1,56		3,27		15,50		348,756	
Coef. disp. (Cd)	150,60		72,37		52,52		33,821	

Quanto à radioquímica (Tab. 3), os dados indicam concentrações de K similares às da gamaespectrometria terrestre, porém, com maior concentração média (1,39%) nos depósitos aluviais. Entretanto, como apenas duas amostras foram coletadas neste ambiente deposicional, esse valor não é representativo, podendo-se considerar os álcali-feldspato granitos como os portadores das concentrações mais elevadas de K, conforme dados obtidos pela gamaespectrometria terrestre.

Equivalente de Urânio (eU)

Com ampla distribuição na área de pesquisa, as concentrações de eU referentes à gamaespectrometria terrestre situam-se entre 0,60 ppm e 19,20 ppm, com média de 6,23 ppm (Tab. 1), ou seja, duas vezes superior à abundância média da crosta terrestre que oscila entre 2 e 3 ppm (Dickson & Scott, 1997; Minty, 1997; Wilford et al., 1997; IAEA, 2003; Bonotto, 2004).

Apesar da distribuição irregular (Cd = 61,85%), o mapa de contorno de urânio terrestre sobreposto ao modelo digital de elevação (Fig. 3B) evidencia a existência de três grandes zonas com valores elevados, situadas no extremo Norte e nas regiões Centro-Sul e Sudeste dos álcali-feldspato granitos, além de traços menores, confirmando o caráter radioanômalo destas rochas.

Conforme o mapa da Figura 3B verifica-se que as zonas mais enriquecidas em urânio estão situadas predominantemente no terço superior de vertentes (cabeceiras de drenagens), prova-

velmente devido à menor espessura e lixiviação menos intensa do manto de alteração. Ocorre então uma redução gradativa nos teores de urânio em direção às regiões de maior altitude (topos de morros), que, por apresentarem declividades menos acentuadas, favorecem a percolação de águas pluviais, as quais permitem a lixiviação deste elemento de mobilidade elevada, principalmente em ambiente oxidante. A partir do terço médio das vertentes, em direção aos fundos de vales, percebe-se novamente uma redução gradativa dos teores de urânio, devida, provavelmente, ao acúmulo de materiais do manto de alteração removidos das porções mais elevadas das vertentes.

Conforme o mapa da Figura 4B, os contatos do Granito Serra do Carambeí são bem delineados por valores elevados. Entretanto, observa-se maiores concentração de eU nas porções Norte e Central do corpo.

Dados de ensaios radioquímicos (Tab. 3), revelaram teores de urânio muito próximos dos obtidos por gamaespectrometria terrestre (Tab. 1), com valores absolutos situados entre <0,50 ppm (limite de detecção do método empregado) e 15,00 ppm, com concentração média de 4,52 ppm.

A dispersão desses radioisótopos segue um padrão similar ao verificado na gamaespectrometria terrestre. Assim, os ensaios radioquímicos mostraram também que os álcali-feldspato granitos são as rochas mais enriquecidas em urânio, com teor máximo de 15,00 ppm e médio de 4,90 ppm.

Equivalente de Tório (eTh)

Dados de gamaespectrometria terrestre indicam que o tório é o radioisótopo mais abundante e de distribuição mais regular na área de pesquisa ($Cd = 48,69\%$). As concentrações variam de 2,40 ppm a 82,20 ppm (média de 33,27 ppm), sendo predominantes os valores mais elevados, superiores a 12,38 ppm (média da crosta terrestre), que ocorrem em mais de 93% das 132 estações de amostragem, conforme se depreende da Tabela 1.

Como se observa no mapa de contorno de tório referente ao levantamento gamaespectrométrico terrestre (Fig. 3C), esse radioisótopo ocorre principalmente nos álcali-feldspato granitos. Além disso, das 81 estações de amostragem implantadas sobre estas rochas, 79 revelaram teores de eTh entre 12,60 ppm e 82,20 ppm e concentração média de 39,58 ppm.

As maiores concentrações de tório são encontradas nas porções mais elevadas da área de estudo, preferencialmente em topos de morros e nas cabeceiras de drenagens (terço superior e médio das vertentes) da área de ocorrência de álcali-feldspato granitos (Fig. 3C). Tal fato reflete a baixa mobilidade desse radioisótopo que, dificultando sua lixiviação pelas águas meteóricas que percolam o manto de intemperismo e alimentam o aquífero freático, possibilita a incorporação e concentração do tório nesse compartimento geomórfico.

Considerando a baixa mobilidade deste elemento e sua concentração nas argilas residuais (adsorção) ocorrentes no topo do perfil de alteração (Queiroz, 1975), é provável que os teores elevados de tório, encontrados geralmente nos terços superiores e médios de encostas, tenham sido originados por lentos movimentos de massa (rastejamentos), os quais, pela baixa taxa de deslocamento, não permitem a mesclagem de diferentes horizontes do manto de alteração. Por conseguinte, o tório liberado da rocha de origem durante o intemperismo, e que se concentra nas argilas residuais das porções superiores do perfil de alteração, seria mantido neste horizonte durante o deslocamento do manto de intemperismo encosta abaixo, traduzindo-se em elevada resposta gamaespectrométrica terrestre.

Os dados aerogamaespectrométricos, de forma similar ao verificado na gamaespectrometria terrestre, evidenciam ampla dispersão do tório na área de pesquisa (50,51%) com concentrações entre 3,14 ppm e 78,84 ppm. Porém, a média de 20,59 ppm dos 1.184 pontos de medição é 8% inferior à verificada no levantamento terrestre. Concentrações mais elevadas, superiores à média da crosta terrestre (12,00 ppm), são predominantes, ocorrendo em mais de 90% dos casos (1.069 pontos, Tab. 2).

Os álcali-feldspato granitos concentram os maiores teores de tório (Fig. 4C), cujos valores absolutos, entre 20,76 ppm a 78,84 ppm e teor médio de 35,77 ppm, confirmam o caráter radioanômalo em tório destas rochas.

As concentrações de tório obtidas nos ensaios radioquímicos foram semelhantes às dos levantamentos gamaespectrométricos terrestre e aéreo, o mesmo se verificando quanto à sua dispersão na área de estudo. Assim, os ensaios radioquímicos mostraram ser os álcali-feldspato granitos as rochas mais enriquecidas em Th, com teor máximo de 85,00 ppm e concentração média de 32,98 ppm (Tab. 3).

A comparação das concentrações de K, eU e eTh estabelecidas na gamaespectrometria terrestre, aérea e nos ensaios radioquímicos é mostrada na Figura 5.

Com relação ao urânio e ao tório, os resultados mostram certa semelhança. Dessa forma, a maior concentração de urânio (19,20 ppm), obtida na gamaespectrometria terrestre, é 54% superior ao teor máximo registrado na aerogamaespectrometria (12,45 ppm) e 28% maior que o máximo resultante dos ensaios radioquímicos (15,00 ppm). Tais diferenças, creditadas a elevada solubilidade do urânio, diminuem quando são comparados os teores médios: 6,23 ppm, 4,52 ppm e 3,74 ppm, respectivamente alcançados pela gamaespectrometria terrestre, radioquímica e aerogamaespectrometria.

Quanto ao tório, talvez pela sua menor mobilidade geoquímica, os teores máximos são próximos: 85,00 ppm, 82,20 ppm e 78,84 ppm, determinados, respectivamente, pelas análises radioquímicas, gamaespectrometria terrestre e aerogamaespectrometria. Em termos de concentrações médias, o valor máximo é registrado pela gamaespectrometria terrestre, que, atingindo 33,27 ppm, é 12,7% superior à da radioquímica e 61,6% maior que a encontrada na aerogamaespectrometria.

Em relação ao potássio, entretanto, os dados aerogamaespectrométricos se mostraram totalmente discrepantes em relação aos demais. Como se verifica na Figura 5 e nas Tabelas 1, 2 e 3, a maior concentração de potássio (6,10%), derivada da gamaespectrometria terrestre, é cerca de 3,5 vezes superior às máximas verificadas na aerogamaespectrometria (1,74%) e nos ensaios radioquímicos (em torno de 20%). Comportamento semelhante é verificado nas concentrações médias: 1,35% de K, registrado pela gamaespectrometria terrestre, é 2,75 vezes e cerca de 30% maior que, respectivamente, os valores aerogamaespectrométricos e radioquímicos. Tais contrastes podem ser decorrentes de problemas no processo de retrocalibração, realizada por BARMP (1997), em conjunção à elevada solubilidade e consequente dispersão do potássio.

Dose anual de radiação (DAR)

Quanto às doses anuais de radiação (DAR), em 85 estações gamaespectrométricas terrestres, em 172 pontos aerogamaespectrométricos e em 31 ensaios radioquímicos foram registrados valores superiores ao sugerido por organismos internacionais

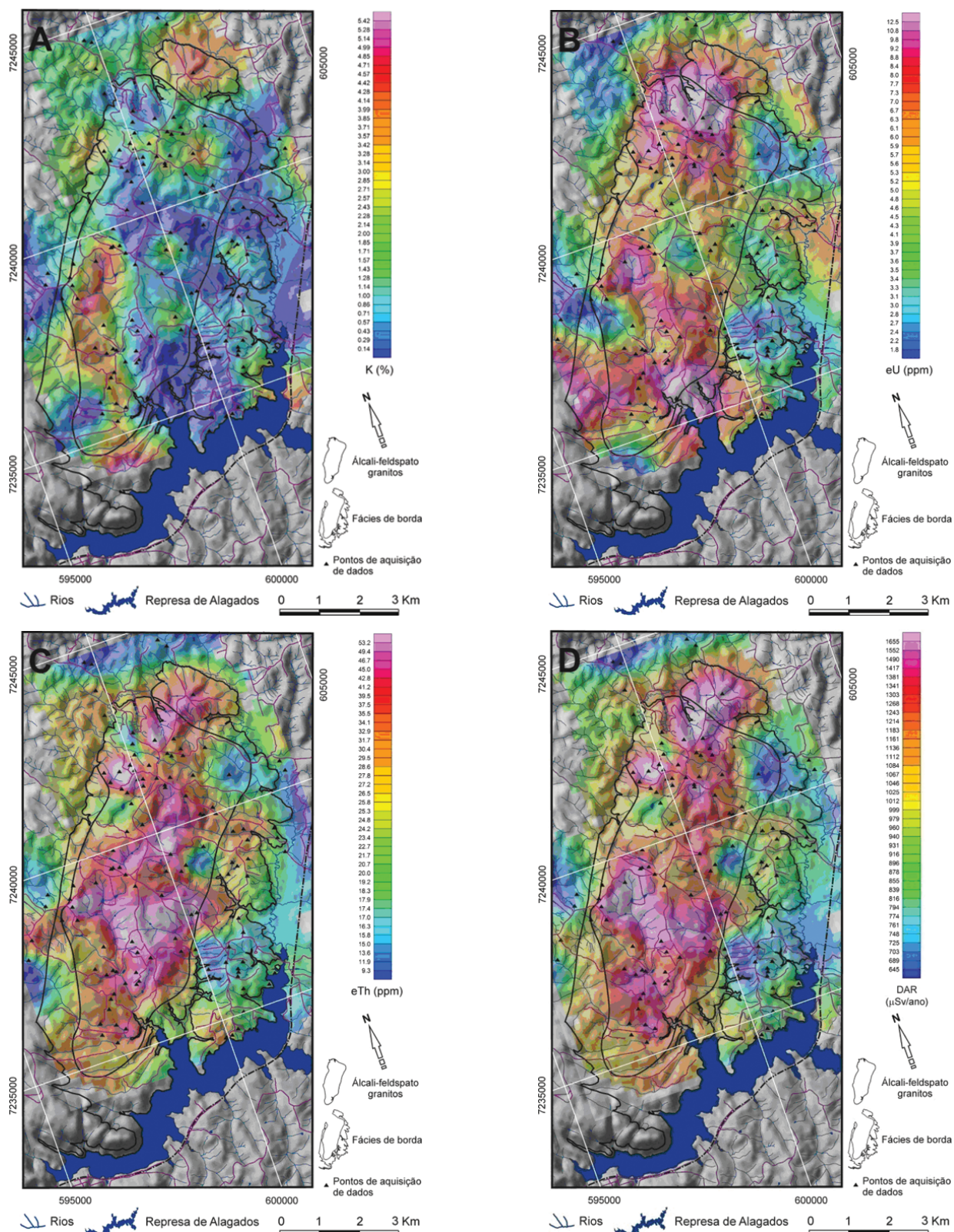


Figura 3 – Mapas de contorno de K (A), eU (B), eTh (C) e DAR (D) referentes ao levantamento gamaespectrométrico terrestre sobrepostos ao modelo digital de elevação.

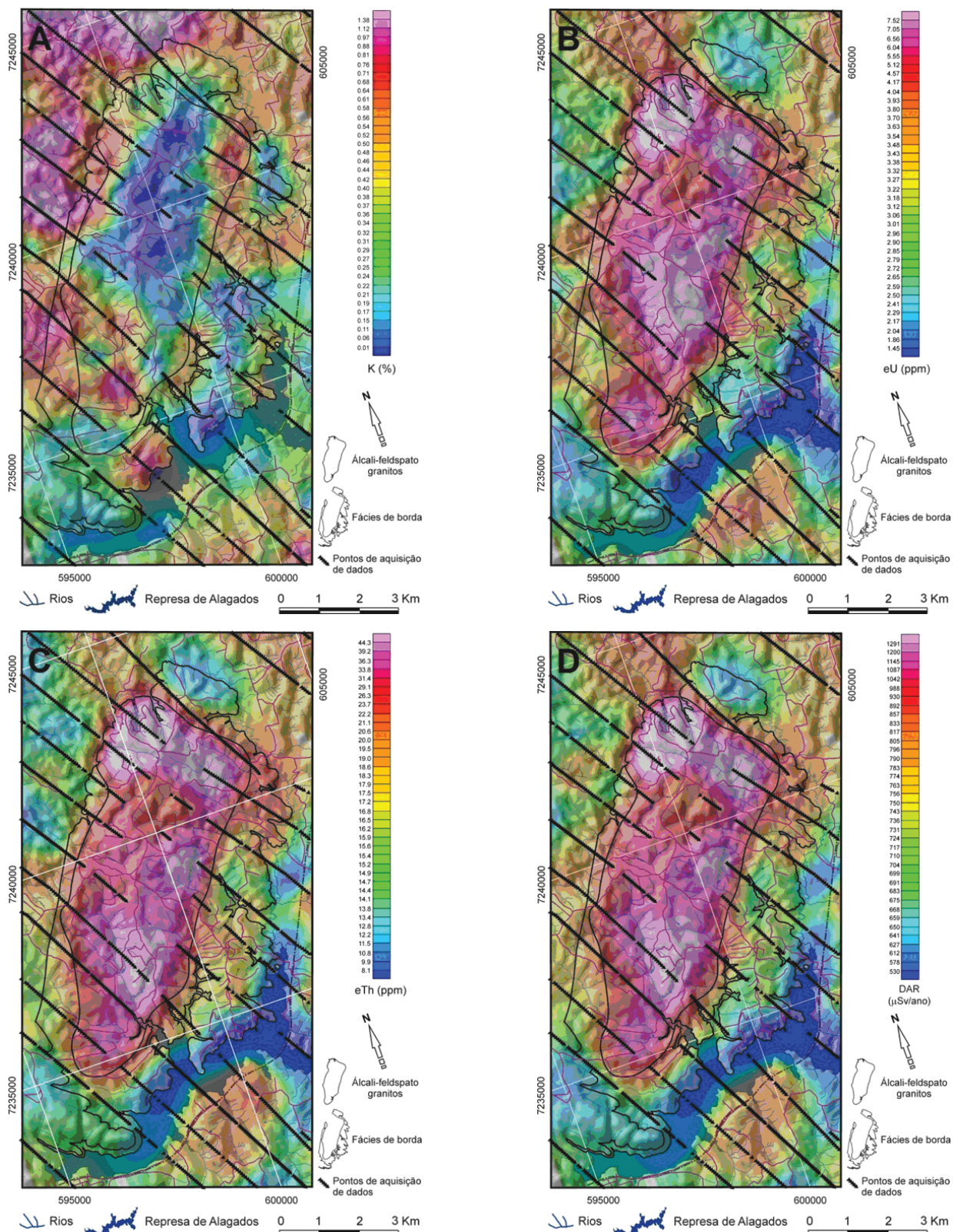


Figura 4 – Mapas de contorno de K (A), eU (B), eTh (C) e DAR (D) referentes ao levantamento aerogamaespectrométrico sobrepostos ao modelo digital de elevação.

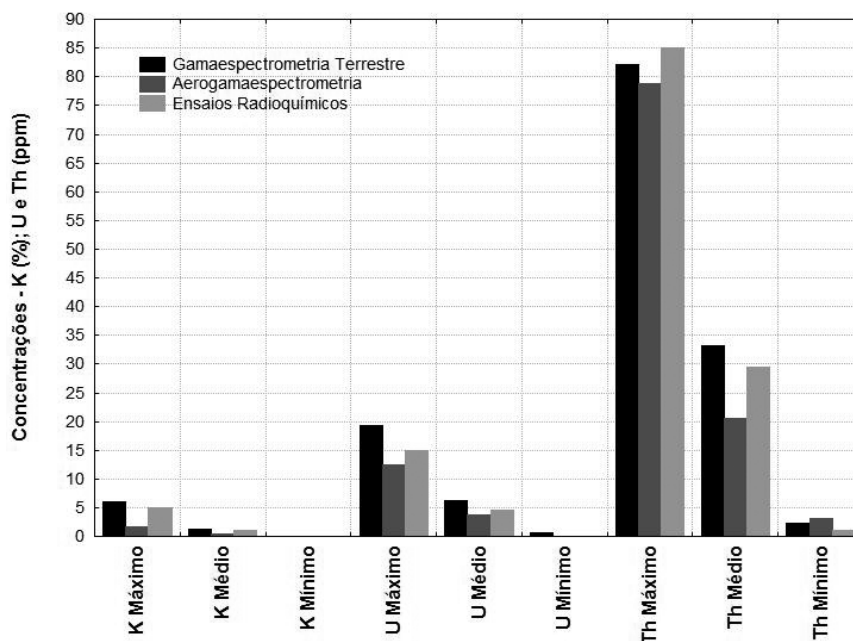


Figura 5 – Concentrações máximas, médias e mínimas de K, eTh e eU, referentes aos levantamentos gamaespectrométricos terrestre e aéreo e aos ensaios radioquímicos.

(1.000 $\mu\text{Sv/ano}$; ICRP, 1990; 2005; CNEN, 2005), atingindo um máximo de 2.293,37 $\mu\text{Sv/ano}$.

Os valores médios de DAR nos levantamentos terrestre e aéreo e nos ensaios radioquímicos foram de 1.173,77 $\mu\text{Sv/ano}$, 817,18 $\mu\text{Sv/ano}$ e 1.031,18 $\mu\text{Sv/ano}$, respectivamente (Tabs. 1, 2 e 3).

Os dados de contagem total (CT) do levantamento aerogamaespectrométrico (Tab. 4) foram expressos em $\mu\text{R/h}$ (BARMP, 1997) que corresponde à antiga unidade de medida de taxa de exposição.

Considerando que 1 $\mu\text{R/h}$ equivale a 0,01 $\mu\text{Sv/h}$ (Andreucci, 2001; LNMRI, 2002), a conversão de taxa de exposição ($\mu\text{R/h}$) para DAR ($\mu\text{Sv/ano}$) foi efetuada por meio da Equação (2):

$$\text{DAR}(\text{CT}(\text{Sv}(\text{ano})) = 8760 \times (\text{CT}(\text{R}(\text{h}))/100) \quad (2)$$

onde DAR-CT corresponde à DAR calculada a partir da contagem total ($\mu\text{R/h}$), e 8760 é o número de horas em um ano.

Tal conversão resultou em DAR-CT entre 54,31 $\mu\text{Sv/ano}$ e 1329,77 $\mu\text{Sv/ano}$, equivalentes, respectivamente, a 13,5% e a 65,5% dos valores mínimo e máximo obtidos pela Equação (1) de Grasty et al. (1984) (Tab. 4). A DAR-CT média de 428,31 $\mu\text{Sv/ano}$ foi 47,6% inferior à obtida por meio da Equação (1).

Portanto, os baixos valores de DAR-CT em relação aos obtidos pela Equação (1) de Grasty et al. (1984) (Tab. 4) podem indicar tanto incorreções na fase de aquisição dos dados, quanto necessidade de ajustes nos fatores de correção e de transfor-

mação dos dados primários, uma vez que os mapas de DAR (Fig. 4D) e DAR-CT (Fig. 6) são equivalentes, mantendo certa proporcionalidade entre os respectivos valores.

De acordo com os dados obtidos, a DAR na área de estudo é influenciada principalmente pelas elevadas concentrações de tório e de urânio, visto que em simulação onde as concentrações de K foram excluídas dos dados gamaespectrométricos terrestres, a DAR média, calculada de acordo com a Equação 1, foi de 1.066,80 $\mu\text{Sv/ano}$ para as 132 estações de amostragem, ou seja, apenas 9,11% inferior ao valor médio em que as concentrações de K foram consideradas. Simulação em que os teores de urânio foram separados forneceu DAR média de 969,04 $\mu\text{Sv/ano}$, ou seja, 17,44% inferior ao valor médio em que as concentrações de urânio foram incluídas. Já na simulação em que as concentrações de tório foram retiradas, a DAR média foi de 631,70 $\mu\text{Sv/ano}$, equivalente a 46,18% da média para as 132 estações de amostragem em que todos os radionuclídeos em estudo foram contemplados (Tab. 5).

Simulações idênticas efetuadas com os dados aerogamaespectrométricos indicaram redução nos valores médios da DAR de apenas 4,75% com a exclusão do potássio, de 15,04% com a supressão do urânio e de 41,05% com a retirada do tório. A mesma simulação, realizada com os dados radioquímicos, mostraram reduções nos valores médios de DAR de 7,95% com a eliminação do potássio, de 14,38% com a remoção do urânio e de 46,63% com a separação do tório (Tab. 5).

Tabela 4 – Distribuição de frequência da contagem total (CT), da dose anual de radiação calculada a partir da Equação (2) (DAR-CT) e da DAR calculada de acordo com a Equação (1), de Grasty et al. (1984), referentes ao levantamento aerogamaespectrométrico da área de estudo (Coef. disp.: coeficiente de dispersão).

Classes	CT		DAR-CT		DAR (Grasty et al., 1984)	
	$\mu\text{R/h}$	Freq.	$\mu\text{Sv/ano}$	Freq.	$\mu\text{Sv/ano}$	Freq.
1	0,62–1,94	38	54,3–170,3	38	403,16–551,00	57
2	1,94–3,27	67	170,3–286,2	67	551,00–698,84	199
3	3,27–4,59	559	286,2–402,2	559	698,84–846,68	608
4	4,59–5,91	303	402,2–518,1	303	846,68–994,52	145
5	5,91–7,24	87	518,1–634,1	87	994,52–1142,36	80
6	7,24–8,56	56	634,1–750,0	56	1142,36–1290,20	48
7	8,56–9,89	43	750,0–866,0	43	1290,20–1438,03	19
8	9,89–11,21	7	866,0–981,9	7	1438,03–1585,87	10
9	11,21–12,53	13	981,9–1079,9	13	1585,87–1733,71	6
10	12,53–13,86	5	1079,9–1213,8	5	1733,71–1881,55	5
11	13,86–15,18	6	1213,8–1329,8	6	1881,55–2029,39	7
Total de estações		1184		1184		1184
Máximo	15,18		1329,8		2029,39	
Média	4,89		428,31		817,18	
Mínimo	0,62		54,31		403,16	
Desvio-padrão	1,98		173,21		219,02	
Coef. disp. (Cd)	40,44		40,44		26,80	

Tabela 5 – Valores médios de DAR calculados de acordo com a Equação (1) de Grasty et al. (1984), a partir de dados de gamaespectrometria aérea, terrestre e de dados radioquímicos e simulações desses valores com exclusão de K, de eU e de eTh.

Método de aquisição de dados	Valores médios de DAR ($\mu\text{Sv/ano}$)			
	Com K, eU, eTh	Exclusão do K	Exclusão do eU	Exclusão do eTh
Gamaespectrometria aérea	817,18	778,35	694,26	481,75
Gamaespectrometria terrestre	1173,77	1066,80	969,04	631,70
Ensaio radioquímicos	1031,19	949,20	882,87	550,31

A forte influência que o tório e o urânio exercem na dose anual de radiação também é confirmada pela grande semelhança dos mapas de contorno desses radionuclídeos e de DAR (Figs. 3B, 3C, 3D, 4B, 4C e 4D), onde zonas que apresentam valores mais elevados de DAR são praticamente as mesmas que agrupam concentrações elevadas de tório e urânio principalmente sobre álcali-feldspato granitos.

Considerando que o potássio e os radioisótopos originados do decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th representam as principais fontes de radiação gama que afetam os seres humanos, teores subestimados desses radionuclídeos, como os obtidos pela aerogamaespectrometria (provavelmente por imprecisões na aquisição, nas correções de rotina e nas transformações dos dados) implicarão, necessariamente, em doses anuais de radiação (DAR)

inferiores às reais. Assim, não se descarta a possibilidade de que as DAR referentes ao levantamento aéreo (Tab. 2) sejam inferiores às que realmente afetam as populações da área de estudo.

Conforme se depreende da Tabela 3, as DAR referentes aos ensaios radioquímicos foram similares às obtidas na gamaespectrometria terrestre, tanto em valores absolutos, quanto na forma de distribuição, visto que as maiores concentrações são restritas aos álcali-feldspato granitos.

CONCLUSÕES

A revisão de estudos anteriores relacionados à geologia local, bem como a análise e interpretação de dados gamaespectrométricos aéreos, terrestres e de ensaios radioquímicos con-

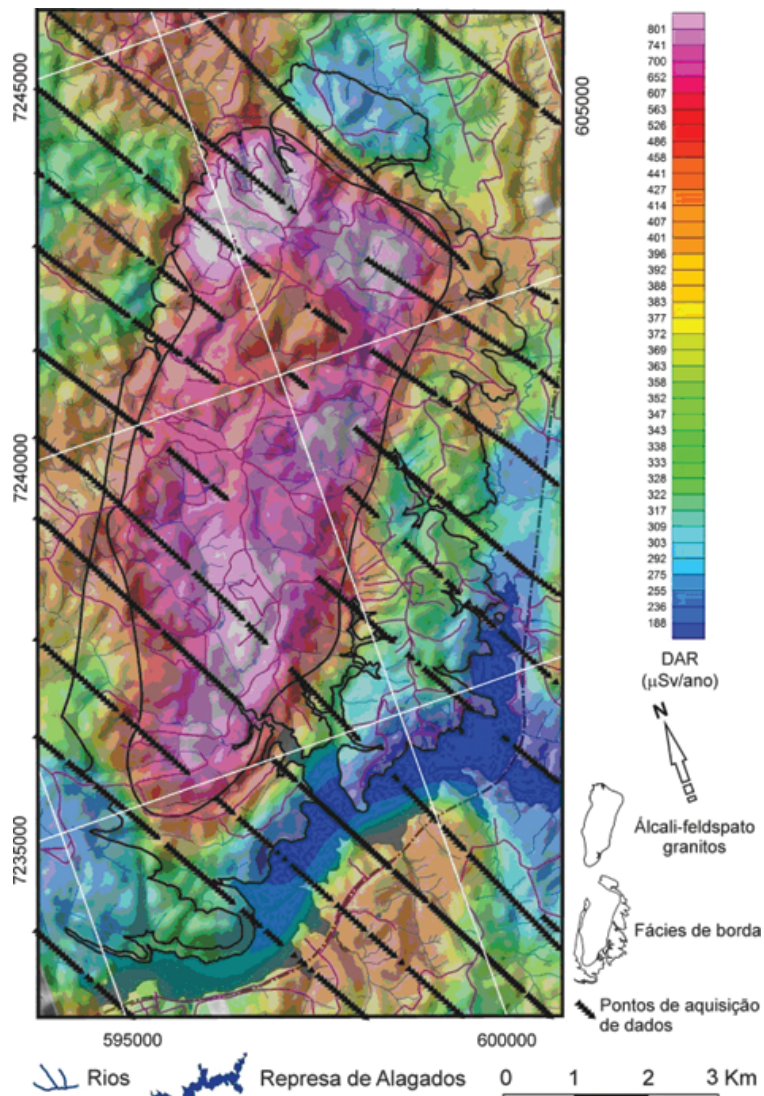


Figura 6 – Mapa de contorno de dose anual de radiação calculada a partir da contagem total (DAR-CT) referente ao levantamento aerogamaespectrométrico sobreposto ao modelo digital de elevação.

firmaram as características radioanômalas atribuídas aos álcali-feldspato granitos, corpo central do Granito Serra do Carambeí.

A brusca variação nas concentrações dos radionuclídeos eTh e eU permitiu definir com maior precisão o contato dos álcali-feldspato granitos, corpo central e tipicamente alásquítico, com as rochas envolventes, pertencentes à fácies de borda do Granito Serra do Carambeí.

Elevadas concentrações de tório e urânio convertidas em dose anual de radiação (DAR), indicaram níveis de radiação natural relativamente elevados, principalmente no extremo Norte e na porção Sul dos álcali-feldspato granitos.

Considerando que as maiores DAR são proporcionais às concentrações dos radionuclídeos K, eTh e eU, que em alguns ca-

sos ultrapassam $2.000 \mu\text{Sv/ano}$, a inalação ou ingestão de materiais particulados (poeiras) pode representar risco às populações fixas ou que desempenham atividades continuadas nesses locais. Em consequência da ingestão ou inalação de radionuclídeos, os órgãos internos, em especial os pulmões, passam a ser direta e continuamente irradiados, constituindo um forte fator de indução de câncer de pulmão (Neves et al., 1996).

É recomendável, pois, a continuidade dos estudos para detalhamento destas áreas, as quais são utilizadas principalmente para fins agrícolas e pecuários, podendo representar um vetor de dispersão de radionuclídeos via cadeia alimentar, face aos riscos associados à saúde de uma população fixa e/ou funcional bastante expressiva.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM – Serviço Geológico do Brasil) pela cessão dos dados aerogamaespectrométricos e a Luís Gustavo de Castro (LPGA/UFPR) pela orientação durante a elaboração dos mapas. F.J.F. Ferreira e L.J.C. Santos agradecem ao CNPq pelas respectivas bolsas de Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER NA, BIGARELLA JJ & SALAMUNI R. 1961. Origem e ambiente de deposição da Bacia de Curitiba. *Boletim Paranaense de Geografia*, 4-5: 71–81.
- ANDREUCCI R. 2001. Curso básico de proteção radiológica – aspectos industriais. Andeucci, Assessoria e Serviços Técnicos Ltda. 3 ed., São Paulo, 91 p.
- ASSINE ML. 1996. Aspectos da estratigrafia das sequências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, USP, São Paulo – SP, 207 p.
- ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 1999. Toxicological profile for ionizing radiation. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service, Atlanta, 395 p.
- BARMP. 1997. Brazil Airborne Radiometric Mapping Project. Paterson, Grant & Watson Limited (PGW), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) and Geological Survey of Canada (GSC), Rio de Janeiro, 18 p.
- BERGAMASCHI S. 1999. Análise Estratigráfica do Siluro-Devoniano (Formações Furnas e Ponta Grossa) da Sub-Bacia de Apucarana, Bacia do Paraná, Brasil. Tese (Doutorado em Geociências). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, USP, São Paulo – SP, 167 p.
- BIGARELLA JJ. 2003. Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Sub-tropicais. Florianópolis: Ed. da UFSC, 3: 877–1436.
- BONOTTO DM. 2004. Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani. São Paulo: Editora UNESP, 252 p.
- CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear. 2005. Diretrizes básicas de proteção radiológica. Resolução n. 27. Disponível em: <<http://www.cnem.gov.br/seguranca/normas/mostra-norma.asp?op=301>>. Acesso em: 07 fev. 2009.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 1978. Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul. CPRM/GEOFOTO (arquivo digital), Rio de Janeiro.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 2003. Manual técnico da área de geoquímica – versão 5.0. Disponível em: <http://www.moodle.ufba.br/file.php/8828/ GEO_158/Aula_09_Geo_158_Geoq/artigos_geoq/manualgeoquimica.pdf>. Acesso em: 17 set. 2009.
- 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.
- FERREIRA FJF, RIFFEL SB, FORLIN M & GUIMARÃES GB. 2001. Gama-espectrometria do Granito Serra do Carambei-PR. In: Congr. Intern. da Soc. Bras. Geof., 7., 2001, Salvador. Anais... Salvador: SBGf, 2001. p. 478–481.
- GRASTY RL, CARSON JM, CHARBONNEAU BW & HOLMAN PB. 1984. Natural background radiation in Canada. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 360: 39 p.
- GUERRA PA. 1988. Geoestatística operacional. Brasília: DNPM, 145 p.
- GUIMARÃES GB. 2000. As rochas granitoides do Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná: aspectos geológicos, geofísicos, geoquímicos e mineralógicos. Tese (Doutorado em Geociências). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, USP, São Paulo – SP, 230 p.
- GUIMARÃES GB, FERREIRA FJF, ULBRICH HHGJ & FORLIN M. 2001. The Aerogeophysical Project Serra do Mar Sul in the region of the Cunhaporanga Granitic Complex, Paraná, Southern Brazil: analysis of the gamma-ray spectrometric survey. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19(1): 3–18.
- GUNN PJ, MINTY BRS & MILLIGAN PR. 1997. The Airborne Gamma-Ray Spectrometric Response Over Arid Australian Terranes. In: GUBINS AG (Ed.). *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Australia, p. 733–740.
- HOWARD RA. 1963. Nuclear physics. Wadsworth Publishing Company, Inc. Belmont, Calif., 578 p.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Vienna: IAEA-TECDOC-1363, 173 p.
- ICRP. International Commission on Radiological Protection. 1990. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford, 1991. (ICRP-60).
- ICRP. International Commission on Radiological Protection. 2005. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Draft for consultation. Disponível em: <http://www.icrp.org/docs/2005_recs_CONSULTATION_Draft1a.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2009.
- KETCHAM RA. 1996. An improved method for determination of heat production with gamma-ray scintillation spectrometry. *Chemical Geology*, 130(3-4): 175–194.
- LNMRI. Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes. 2002. Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante (Recomendações e definições). Rio de Janeiro, 27 p.
- MARANHÃO RJL. 1985. Introdução à Pesquisa Mineral. Fortaleza: BNB, ETENE, 3 ed., 752 p.

- MILANI EJ, MELO JHG, SOUZA PA, FERNANDES LA & FRANÇA AB. 2007. Bacia do Paraná. In: Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2): 265–287.
- MINEROPAR. Minerais do Paraná S.A. 2006a. Mapas Geológicos do Paraná, Folha Ponta Grossa – Escala 1:250.000. 2 ed. Software de Geoprocessamento: ArcView 3.
- MINEROPAR. Minerais do Paraná S.A. 2006b. Mapas Geológicos do Paraná, Folha Telêmaco Borba – Escala 1:250.000. 2 ed. Software de Geoprocessamento: ArcView 3.
- MINTY BRS. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17(2): 39–50.
- NCRP. National Council on Radiation Protection & Measurements. 1987. Ionizing radiation exposure of the population of the United States. NCRP Report n. 93, 69 p.
- NEVES LJPF, PEREIRA AJSC, GODINHO MM & DIAS JM. 1996. A radioatividade das rochas como um factor de risco ambiental no território continental português: uma síntese. In: BORREGO C, COELHO C, ARROJA L, BOIA C & FIGUEIREDO E (Eds.). Conf. Nac. sobre a Qualidade do Amb., 6: 1996, Portugal, 1: 641–650.
- PINTO-COELHO CV. 1986. O Granito Serra do Carambeí – PR e as anomalias uraníferas associadas. Dissertação (Mestrado). Departamento de Geociências, Universidade de Brasília – UnB, 309 p.
- QUEIROZ FCP. 1975. Distribuição da radioatividade natural no perfil de um podzol tropical e suas implicações genéticas. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Bahia – UFBA, 60 p.
- RIFFEL SB, FERREIRA FJF, FORLIN M & GUIMARÃES GB. 2001. Aplicação da Gamaespectrometria (K, eTh, eU) na Caracterização do Granito Serra do Carambeí-PR. In: Cong. Bras. Geol., 8 e Simp. Geol. Países do Mercosul, 1: 2001, Curitiba. Anais... Curitiba: SBGq, 2001 (CD-ROM).
- SILVA DC da & MANTOVANI MSM. 1994. Projeto aerogeofísico Serra do Mar Sul: uma abordagem semi-quantitativa. Revista Brasileira de Geociências, 24(2): 120–127.
- TAUHATA L, SALATI IPA, DI PRINZIO R & DI PRINZIO AR. 2003. Radioproteção e dosimetria: fundamentos. 5 ed. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 263 p.
- TURNER SP, REGELORES M, KELLEY S, HAWKESWORTH CJ & MANTOVANI MSM. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. Earth and Planetary Science Letters, 121: 333–348.
- ULBRICH HHGJ, ULBRICH 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. Revista do Instituto de Geociências USP. Série Científica. São Paulo, 9(1): 33–53.
- UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations, New York, UNSCEAR Report, vol. 1, 654 p.
- 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

Luiz Carlos Godoy é Geólogo (UFPR-1978), Especialista em Informática (UEPG-1985), Mestre em Engenharia de Materiais (UEPG-2003) e Doutor em Geologia Ambiental (UFPR-2010). Atuou profissionalmente nas empresas Costalco – Mineração, Indústria e Comércio Ltda. (1979-1986) e Marc – Mineração, Indústria e Comércio Ltda. (1981-1986) em pesquisa e avaliação de jazidas de minerais não metálicos. Ingressou no Departamento de Geociências da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) como Professor Colaborador em 1985 e, a partir de 1988, como Professor Auxiliar. Atualmente é Professor Assistente, ministrando aulas de Geologia para os cursos de Engenharia Civil e Licenciatura em Biologia da UEPG. É líder do Grupo de Pesquisa Palaios – Paleontologia e Estratigrafia do Departamento de Geociências da UEPG.

André Virmond Lima Bittencourt é Engenheiro Químico (UFPR-1970), Mestre e Doutor em Ciências (USP-1973; USP-1978), com atuação profissional na Administração de Recursos Hídricos/Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente de 1974 a 1983. Ingressou no Departamento de Geologia da UFPR como Professor Assistente em 1974, sendo Professor Titular de Geoquímica desde 1982. Foi chefe do Departamento de Geologia e Diretor do Setor de Ciências da Terra da UFPR. Atualmente é Professor Sênior vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFPR, onde ministra as disciplinas Geoquímica Ambiental e Geoquímica das Águas. Faz parte do Grupo de Pesquisa em Hidrogeologia do Departamento de Geologia da UFPR. É Sócio-Diretor da TELLURIS Hidrogeoquímica e Soluções Ambientais Ltda., atuando como consultor.

Leonardo José Cordeiro Santos é Geógrafo (UERJ-1988), Mestre e Doutor em Geografia Física (USP-1995; USP-2000), com estágio no Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Rennes/França. Ingressou na Universidade Federal do Paraná como Professor Adjunto em 2002. Foi coordenador do Programa de Pós-Graduação (Mestrado e Doutorado) em Geografia da UFPR (2008-2009). É presidente da União da Geomorfologia Brasileira (UGB) e Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq (1D). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geomorfologia e Pedologia.

Francisco José Fonseca Ferreira é Geólogo (UFPE-1970), Especialista em Geofísica Aplicada (UFBA-1974), Mestre e Doutor em Ciências (USP-1982; USP-1991), com atuação profissional na CPRM (1972-1980) e no IPT (1980-1990). A partir de 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. Atualmente é Professor Associado do Departamento de Geologia da UFPR, onde ministra disciplinas de Geofísica Aplicada nos cursos de graduação e pós-graduação, e Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq (1D).