



# Determinação dos níveis de radioatividade natural em amostras de solo do Núcleo Piraquara – Parque Estadual da Pedra Branca

Edmilson Monteiro de Souza<sup>1</sup>, Jorge do Ouro Neto<sup>1</sup>, Sidney Gomes de Oliveira<sup>2</sup>, Alessandro Mariano Domingues<sup>3</sup>, Samanda Cristine Arruda Correa<sup>4</sup>, Ademir Xavier da Silva<sup>5</sup>

## AUTHOR AFILIATIONS

1 – Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO  
2 - Centro Universitário Augusto Motta - UNISUAM  
3 – Programa de Engenharia Nuclear – PEN/COPPE/UFRJ  
4 – Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN  
5 - Escola Politécnica - DNC/POLI/UFRJ

## CONTACT

[emsmonteiro@gmail.com](mailto:emsmonteiro@gmail.com)

## ABSTRACT

In this work the high-resolution gamma spectrometry technique with HPGe detector and the Canberra software GENIE 2000 were utilized to determinate the activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  isotopes in samples of soils, and the radiological risk to visitors of Núcleo Piraquara – Pedra Branca State Park. The values measured to activity concentration of  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  were significantly higher than world average reported to literature. However, the AEDE,  $R_{\text{eq}}$  and  $H_{\text{ext}}$  índices were found lower then world average. This signifies wich there are no radiological risk to visitor in the analysed region.

**Keywords:** Activity concentration, Nucleo Piraquara, natural radioactivity, radiological risk.

## RESUMO

Nesse trabalho foi utilizada a técnica da espectrometria gama de alta resolução com detector HPGe e o pacote de software GENIE 2000 para a determinação da concentração de atividade dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  presente em amostras de solo, e o risco radiológico para visitantes do Núcleo Piraquara, importante Trilha de Ecoturismo do Parque Estadual da Pedra Branca – RJ. Os resultados apresentaram concentrações de atividades para os radionuclídeos  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  significativamente acima da média global reportada pela literatura. Entretanto, os valores encontrados para AEDE,  $R_{\text{eq}}$  e  $H_{\text{ext}}$  se mostraram inferiores aos valores de referência mundiais, demonstrando que a região estudada não oferece risco radiológico aos visitantes.

**Palavras-chave:** Concentração de atividade, Núcleo Piraquara, radioatividade natural, risco radiológico.

## INTRODUÇÃO

Estudos radiométricos e radioecológicos vêm sendo desenvolvidos mundialmente em busca do mapeamento de áreas com elevados níveis de radioatividade natural, um pré-requisito essencial na investigação da exposição dos seres humanos à radiatividade ambiental (Santos Júnior, 2009). Os níveis de radioatividade e de exposição dependem primariamente das condições geológicas de cada região e da concentração de Potássio ( $^{40}\text{K}$ ), Urânio e Tório e seus produtos de decaimento nas rochas que, por processos de intemperismo, são transferidos para o solo (Bakar et al. 2017).

Com a prática do Ecoturismo, tem-se aumentado a presença da população em regiões formadas em sua maioria por reservas florestais, onde os níveis de radioatividade natural são pouco conhecidos. Por serem ecossistemas complexos, de condições geológicas variadas e ricos em matéria orgânica, os ambientes florestais podem reter os radionuclídeos no solo por longo tempo (Karadeniz et al. 2015).

Consequentemente é de vital importância o desenvolvimento de estudos radiométricos nestas regiões, visando proteger os visitantes de eventuais efeitos causados pelas radiações ionizantes.

Localizado na Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro, o Núcleo Piraquara é uma reserva florestal pertencente ao Parque Estadual da Pedra Branca (PEPB), sendo visitado por grande número de pessoas em virtude do seu grau de urbanização e número de atrativos disponíveis (INEA, 2013). Considerando isto, o objetivo deste estudo é determinar a concentração de atividade dos radionuclídeos naturais  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em amostras de solo da Trilha Piraquara do PEPB e avaliar a dose efetiva anual e risco radiológico para os visitantes.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Coleta e preparação das amostras

Duas regiões foram escolhidas para estudo. A primeira está localizada próximo a um Deck construído para a prática de banho; A segunda região corresponde ao local onde

encontra-se a principal piscina natural da Trilha (INEA, 2013). Os pontos de coleta foram escolhidos em função da facilidade de acesso ao turista e ao morador, o tempo de permanência e a concentração de visitantes. Para cada região abordada, um total de 02 amostras de solo foi coletada, em posições diametralmente opostas. A distância entre os pontos de coleta, para cada região específica, foi de 04 metros.

As amostras de solo foram coletadas manualmente com auxílio de uma pá de corte, à uma profundidade aproximada de 15 cm da superfície. Não foram realizados estudos para determinação do tipo de solo coletado, bem como tratamento para separação de fragmentos de rocha e matéria orgânica, uma vez que o objetivo é a verificação da concentração de atividade dos radionuclídeos presentes, e demais grandezas derivadas, respeitando as características originais do solo encontrado. Uma vez no laboratório as amostras foram secas ao ar. Essa secagem foi realizada em uma área protegida do vento de maneira a não se perder a fração fina das amostras, e evitar contaminação com outros materiais. Todo o procedimento foi realizado no

Laboratório Didático e Pesquisa de Processamento de Materiais – LDPPM da Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO. Posteriormente as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Análises Ambientais e Modelagem Computacional – LAASC do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ, para análise através da Técnica de Espectrometria Gama de Alta Resolução com detector semicondutor de Germânio Hiper-Puro (HPGe).

Uma vez no LAASC/UFRJ, as amostras foram acondicionadas em recipientes cilíndricos de polipropileno de volume igual a 375 ml, e suas massas aferidas utilizando uma balança digital da marca *Gehaka*, modelo BG 4000, com resolução de centésimos de gramas, com massas padronizadas de 400 g. Posteriormente os recipientes tiveram suas tampas lacradas e etiquetadas, e as amostras foram mantidas em repouso durante o período de 40 dias, visando alcançar a condição de equilíbrio radioativo secular (Carnet et al. 1990).

### **Análise das amostras**

Para obtenção dos espectros de emissão gama, e a concentração de atividade, em  $\frac{Bq}{kg}$ , dos radionuclídeos naturais  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  nas amostras, foi utilizado um sistema de espectrometria gama de alta resolução produzido pela *Canberra Industries*, composto por um detector semicondutor de Germânio Hiper-Puro (HPGe) vertical modelo GC3020, com eficiência relativa de 30%, acoplado a um pré-amplificador do tipo RC, modelo 2002C, sistema multicanal modelo DAS 1000 (*Digital Spectrum Analyzer*), de 8192 canais, com faixa de energia trabalhada de 50 keV até 2 MeV. O cristal de germânio é do tipo coaxial, com 62 mm de diâmetro e 40 mm de altura. A fim de minimizar os efeitos da radiação de fundo, o detector é envolto por uma blindagem produzida pela *Canberra Industries*, modelo 747, com espessuras de 10 cm de chumbo, 1mm de estanho e 1,6mm de cobre. Essa blindagem ainda é recoberta externamente por 9,5mm de aço com baixa percentagem de carbono. A **Figura 1** mostra o sistema de espectrometria gama de alta resolução utilizado neste trabalho.



Figura 1: Espectrômetro de alta resolução composto por detector HPGe e eletrônica associada, instalado no LAASC/PEN/COPPE/UFRJ.

A calibração em energia do sistema foi realizada utilizando três fontes radioativas certificadas, de Césio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), Cobalto-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) e Európio-152 ( $^{152}\text{Eu}$ ), totalizando um número de cinco pontos experimentais correspondentes aos picos do  $^{137}\text{Cs}$  (0,6617 MeV),  $^{60}\text{Co}$  (1,17 MeV e 1,33 MeV) e  $^{152}\text{Eu}$  (0,1218 MeV e 0,3443 MeV).

O tempo de contagem utilizado para o levantamento dos espectros de fundo (*background*) e do espectro bruto das amostras analisadas foi de 8 horas (28800 segundos). Para a determinação da radiação de fundo do LAASC/UFRJ, foi utilizado um recipiente

cilíndrico vazio, idêntico ao utilizado para acondicionamento das amostras. Para obtenção dos espectros utilizados para a análise, o espectro de fundo do LAASC foi subtraído do espectro de radiação gama oriundos das amostras. Os valores de MDA (Atividade Mínima Detectável) do arranjo experimental, para um nível de confiança de 95%, foram determinados com base na Derivação de Curie (ISO, 2007; ISO, 2010). Para a medição das atividades específicas do  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  foram aferidas as energias de 1,764 MeV da radiação gama emitida pelo  $^{214}\text{Bi}$  e de 0,9111 MeV emitida pelo  $^{228}\text{Ac}$ , respectivamente. Para aferir a atividade específica do  $^{40}\text{K}$  foi utilizada a sua própria energia de decaimento gama de 1.460 MeV.

A calibração do sistema de detecção, o processamento dos espectros brutos de radiação gama oriundos das amostras, bem como a subtração destes do espectro de fundo, a determinação da concentração de atividade em  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$  dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , e os valores de MDA foram obtidos com o auxílio dos

softwares constantes na suíte GENIE 2000 (Canberra, 2012).

### **Estimativa da Taxa de Dose Externa no ar (D), Atividade de Equivalente de Rádio ( $R_{\text{eq}}$ ), Índice de Risco Radiológico Externo ( $H_{\text{ext}}$ ) e Equivalente de Dose Efetiva Anual (AEDE)**

A taxa de dose absorvida  $\dot{D}$  devido a radiação gama natural ao ar livre, a 1m de distância da superfície, foi calculada a partir das concentrações de atividade dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , e utilizando os fatores de conversão de dose estabelecidos por *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) em 2000 (UNSCEAR, 2000). A fórmula utilizada para o cálculo de  $\dot{D}$  é apresentada na **Equação 1**.

$$\dot{D} \left( \frac{\text{nGy}}{\text{h}} \right) = 0,462 \cdot A_{\text{Ra}} + 0,604 \cdot A_{\text{Th}} + 0,042 \cdot A_{\text{K}} \quad (1)$$

onde  $A_{\text{Ra}}$ ,  $A_{\text{Th}}$  e  $A_{\text{K}}$  são, respectivamente, as concentrações de atividade do  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ .

A estimativa da dose equivalente efetiva anual (AEDE) devido a radiação gama natural no ar, a 1 m da superfície, foi obtida através da **Equação 2**.

$$AEDE \left( \frac{mSv}{ano} \right) = \dot{D} \left( \frac{nGy}{h} \right) \cdot 8760 \left( \frac{h}{ano} \right) \cdot 0,2 \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} \left( \frac{mSv}{nGy} \right) \quad (2)$$

Para o cálculo de AEDE, foi adotado o fator de conversão de  $0,7 \cdot 10^{-6} nGy$  de dose absorvida no ar para a Dose Efetiva, em  $mSv$  (UNSCEAR, 2000). 8760 é o fator de conversão de 365 dias para horas e 0,2 corresponde ao fator de ocupação de 20% (UNSCEAR, 2000).

A Atividade de Equivalente de Rádio ( $Ra_{eq}$ ) é um parâmetro estabelecido para representar as atividades de  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  e  $^{40}K$  por uma grandeza única (Beretka and Mathew, 1985; Krieger, 1981). É um índice importante na investigação da dose, ou na avaliação do risco radiológico. Tem sido mundialmente utilizado na certificação de materiais de construção para exportação, sendo considerado uma forma rápida e alternativa de estimar os níveis de

radioatividade natural nesses materiais. A **Equação 3** será utilizada para estimar o valor de  $Ra_{eq}$ .

$$Ra_{eq} \left( \frac{Bq}{kg} \right) = A_{Ra} + 1,43 \cdot A_{Th} + 0,077 \cdot A_K \quad (3)$$

onde  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  e  $A_K$  são respectivamente, as concentrações de atividade do  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  e  $^{40}K$ . Segundo recomendação da *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)*, o uso de materiais de construção cuja atividade de equivalente de rádio ( $Ra_{eq}$ ) excede  $370 \frac{Bq}{kg}$  é desaconselhado, a fim de evitar riscos por exposição externa.  $370 \frac{Bq}{kg}$  corresponde ao limite de dose de  $1,0 mSv$  para indivíduos de público (OECD, 1979).

Outro índice a ser considerado na avaliação da exposição provocada pelas amostras analisadas é o índice de risco externo ( $H_{ex}$ ). O critério utilizado para este modelo pondera as concentrações de  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  e  $^{40}K$  no material e considera que a dose por exposição externa deve

ser limitada a  $1,5 \frac{mSv}{ano}$  (ICRP, 1977). Neste trabalho, o índice de risco externo ( $H_{ex}$ ) calculado para as amostras coletadas foi calculado utilizando a **Equação 4** (Krieger, 1981):

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} < 1 \quad (4)$$

onde  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  e  $A_K$  são as concentrações de atividade do  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  encontradas nas amostras analisadas, em  $\frac{Bq}{kg}$ , respectivamente. O valor máximo do índice de risco externo ( $H_{ex}$ ) deve ser menor que a unidade para que o risco de exposição à radiação externa seja considerado desprezível (Krieger, 1981).

Quenching & Control of Distortion, USA, 1992.

## RESULTADOS

### Concentração de Atividade de $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ e $^{40}\text{K}$ nas amostras de solo

Os resultados das análises radiométricas para determinação da concentração de atividade dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  para cada região abordada, bem como a comparação da média aritmética desses valores com a média mundial de concentração de atividade para estes radionuclídeos são apresentados na **Tabela 1**. Os valores de MDA, em  $\frac{Bq}{kg}$ , para um nível de confiança de 95%, foram aproximadamente 0,05 para o  $^{226}\text{Ra}$ , 0,1 para o  $^{232}\text{Th}$  e 0,4 para  $^{40}\text{K}$ .

Tabela 1: Concentração de Atividade dos elementos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  nas amostras de solo do Núcleo Piraquara e valor médio mundial.

Localização da Amostra	Concentração de Atividade ( $\frac{Bq}{kg}$ )			Referência
	$^{226}\text{R}$	$^{232}\text{T}$	$^{40}\text{K}$	
	a	h		
Deck 01	21	90	654	
Deck 02	25	143	724	Núcleo
Piscina natural	16	71	626	Piraquara (PEPB/RJ)
01				Este
Piscina natural	19	76	679	Estudo
02				

Média	20,2	95	670,2	
aritmética	5		5	
Média	35	30	400	UNSCEA
Mundial				R, 2000

Todas as amostras apresentaram valores de concentrações de atividade superiores ao MDA. As análises encontraram concentrações de atividades para o  $^{226}\text{Ra}$ , de 16 a  $21 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ , com média de  $20,25 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ , para o  $^{232}\text{Th}$ , de 71 a  $143 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ , com média de  $95 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ , e para o  $^{40}\text{K}$ , de 626 a  $724 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ , com média de  $670,25 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ . Observa-se que os valores encontrados para os radionuclídeos  $^{232}\text{Th}$  e o  $^{40}\text{K}$  estão significativamente acima da média global reportada pela UNSCEAR, de  $30 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$  e  $400 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$  respectivamente. Os valores comparativamente altos encontrados para as concentrações de atividade do  $^{232}\text{Th}$  e o  $^{40}\text{K}$  podem ser explicados através das características geológicas do Parque Estadual da Pedra Branca, Unidade de Conservação onde se encontra o Núcleo Piraquara. O Maciço da Pedra Branca é

composto por um grupo de rochas com litologias distintas, envolvendo a ocorrência de granitóides de variadas texturas e estruturas, além de gnaisses e migmatitos encaixantes (INEA, 2013). Em geral concentrações de Atividade mais altas são comuns em rochas ígneas (graníticas) em relação às sedimentares e metamórficas (El-Arabi, 2007; Bastos, 2008; Marocchi et al. 2011). Devido aos processos de intemperismo, os radionuclídeos migram das rochas para o solo. Consequentemente, solos derivados de rochas ígneas possuem níveis mais elevados de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ . Embora mais altas do que as médias mundiais, as concentrações de atividades estão em concordância com valores obtidos em pontos turísticos com geologia semelhante, conforme mostra a **Tabela 2**.

Tabela 2: Concentração de Atividade dos elementos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  nas amostras de solo do Núcleo Piraquara e comparação com pontos turísticos com geologia semelhante.

Região Analisada	Contração de Atividade ( $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ )			Referência
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	
Núcleo	16 a	71 a	626 a	Este trabalho
Piraquara	25	143	724	



(PEPB/R J)				
Floresta de Monte IDA - Turquia	5 a	6 a	43 a	(Karadeniz et al, 2015)
Montanha a Fraser's Hill – Pahang, Malasia	3 a	108,3	137,88	(Bakar et al, 2017)
	279,6	9 a	a	
	5	360,5	2634,9	
		5	9	
Northern Peninsular Malaysia (Perlis, Kedah, Penang & Perak)	7 a	10 a	104 a	(Almayahi et al, 2012)
	222	158	1225	

**Estimativa da Taxa de Dose Absorvida  $\dot{D}$ ,  
Atividade de Equivalente de Rádio ( $Ra_{eq}$ ),  
Equivalente de Dose Efetiva Anual (AEDE) e  
Índice de Risco Externo ( $H_{ex}$ )**

Os valores da taxa de dose absorvida no ar a 1 m da superfície do solo, atividade de

equivalente de rádio, equivalente de dose efetiva anual e índice de risco externo foram calculados e apresentados em conjunto com valores de referência fornecidos por UNSCEAR (UNSCEAR, 2000), como mostra a **Tabela 3**.

Tabela 3: Taxa de Dose Absorvida ( $\dot{D}$ ), Atividade de Equivalente de Rádio ( $Ra_{eq}$ ), Equivalente de Dose Efetiva Anual (AEDE) e Índice de Risco Externo ( $H_{ex}$ ) para as amostras de solo analisados e comparação com valores mundiais de referência.

Localização	$\dot{D} \left( \frac{nGy}{h} \right)$	$Ra_{eq} \left( \frac{Bq}{kg} \right)$	$AEDE \left( \frac{mSv}{ano} \right)$	$H_{ext}$
Deck 01	91,3	170,4	0,168	0,5
				4
Deck 02	128,1	234,5	0,236	0,7
				7
Piscina natural 01	76,4	142,1	0,141	0,4
				5
Piscina natural 02	83	155,4	0,153	0,4
				8
Média aritmética	94,7	175,6	0,175	0,5
				6
Valor de Referência	55	370	0,5	1
a				

Os resultados obtidos de taxa de dose absorvida variam de 76,4 a 128,1  $\frac{nGy}{h}$ , com valor

médio de  $94,7 \frac{\text{nGy}}{\text{h}}$ , estando de 28% a 132% superiores ao valor mundial de referência, de  $55 \frac{\text{nGy}}{\text{h}}$ . Atribui-se estes altos valores às elevadas concentrações de atividade do  $^{232}\text{Th}$  e especialmente do  $^{40}\text{K}$  encontradas nas amostras, conforme apresentado anteriormente na Tabela 1, refletindo a influência da formação geológica do Núcleo Piraquara no *background* de radioatividade natural da região. Embora os valores de taxa de dose absorvida estejam acima do valor mundial de referência, tal comportamento não se reproduz com relação ao equivalente de dose efetiva anual, que apresentou resultados na faixa de  $0,141$  a  $0,236 \frac{\text{mSv}}{\text{ano}}$ , com valor médio de  $0,175 \frac{\text{mSv}}{\text{ano}}$ . Estes valores são inferiores à média mundial de referência, de  $0,5 \frac{\text{mSv}}{\text{ano}}$ . Considerando-se que os valores encontrados para a  $Ra_{eq}$  são inferiores a  $370 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ , e que os valores de  $H_{ext}$  são menores que a unidade, estima-se que não há risco radiológico significativo para as amostras de solo nas áreas estudadas.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que os valores médios de concentração de atividade dos radionuclídeos  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  estão acima dos valores de referência da literatura, comportamento reproduzido para os valores médios da taxa de dose absorvida a 1 m da superfície do solo, inclusive para o  $^{226}\text{Ra}$ . Atribui-se esta elevação nos valores às características geológicas do Parque Estadual da Pedra Branca. Entretanto, os valores encontrados para AEDE,  $Ra_{eq}$  e  $H_{ext}$  se mostraram inferiores aos valores de referência mundiais, demonstrando que a região estudada não oferece risco radiológico aos visitantes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer o apoio e suporte operacional do Instituto Estadual do Ambiente – INEA/RJ, através de suas equipes, e o apoio e suporte financeiro da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, (FAPERJ), Processo E-

26/200.028/2019, para o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ALMAYAH B.A., TAJUDDIN A.A., JAAFAR M.S. 2012a. Radiation hazard indices of soil and water samples in Northern Malaysian Peninsula. *Appl. Radiat. Isot* 70(11):2652-2660.

BAKAR A S A, HAMZAH Z, SAAT A. 2017. Measurements of natural radioactivity in soil of Fraser's Hill, Pahang, Malaysia. *AIP Conference Proceedings* 1799: 030009-1 – 030009-10.

BASTOS R O. 2008. Radioatividade de rochas provenientes das formações geológicas pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Tibagi. Tese (Doutorado), Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008, 196p.

BERETKA J, MATHEW PJ. 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Phys* 48:87–95.

CANBERRA, GENIETM 2000 3.3: Operations Manual, EUA, 2012.

CARNET A, JACQUENIN R. 1990. Methods for measuring radium isotopes: Gamma spectrometry. *Environmental behaviour of radium. IAEA Technical Report Series* 310: 189-204. IAEA, Vienna, 1990.

EL-ARABI A. 2007. Ra-226, Th-232 and K-40 concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt, and its radiological implications. *Radiat. Meas* 42: 94-100.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. 2013. Trilhas: Parque Estadual da Pedra Branca. Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente, INEA, 2013

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. 1977. *Recommendations of ICRP*. Pergamon Press, Publication ICRP 26, Oxford.

- INTERNATIONAL STANDARD. 2007. Water quality – Determination of the activity concentration of radionuclides – Method by high resolution gamma ray spectrometry, ISO 10703, 2007.
- INTERNATIONAL STANDARD. 2010. Determination of characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation – Fundamental and applications, ISO 11929. 2010.
- KARADENIZ K, KARAKURT H, AKAL, C. 2015. Natural radionuclide activities in forest soil horizons of Mount IDA/Kazdagi, Turkey. *Environ Monit Assess* 187: 319.
- KRIEGER, V R. 1981. Radioactivity of construction materials. *Betonwerk und Fertigteil-Technik* 47: 468-473.
- MAROCCHI M, RIGHI S, BARGOSSO G M, GASPAROTTO G. 2011. Natural radionuclides content and radiological hazard of commercial ornamental stones, an integrated radiometric and mineralogical-petrographic study. *Radiat. Meas* 46:538-545.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. (1979). “Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials”. Report by Nuclear Energy Agency - NEA Group of Experts. Paris: OECD.
- SANTOS JUNIOR J A. 2009. Avaliação radiométrica do U-238, Ra-226, Th-232 e K-40 em uma área anômala do agreste de Pernambuco. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2009, 139p.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. (2000), “Sources and Effects of Ionizing Radiation”, UNSCEAR 2000 Report Vol.1 to the General Assembly, with scientific annexes, United Nations Sales Publication, United Nations, New York.