

RADIONUCLÍDEOS NATURAIS EM ÁGUAS MINERAIS E LAMA SULFUROSA UTILIZADAS EM TERAPIA TERMAL NO BRASIL

Joselene de Oliveira*, Barbara Paci Mazzilli*,
Marcelo Bessa Nisti* e Maria Helena de Oliveira Sampa**

*Departamento de Radioproteção Ambiental

**Departamento de Aplicações de Técnicas Nucleares
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Caixa Postal 11049
05508-900, São Paulo, Brasil

RESUMO

As concentrações dos radionuclídeos naturais (^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{222}Rn) foram determinadas em amostras de água mineral radioativa, água mineral sulfurosa, lama sulfurosa e ar coletadas nas Termas de Araxá (MG), Brasil. Nas águas minerais utilizadas em terapia termal, foram observadas concentrações de ^{222}Rn de até 657 Bq/L. As concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra obtidas nas mesmas amostras variaram de 54 a 99 mBq/L e de 87 a 173 mBq/L, respectivamente. No banho de lama sulfurosa as concentrações de ^{232}Th variaram de 0,7 a 1,0 Bq/kg, as de ^{226}Ra variaram de <0,3 a 1,0 Bq/kg e as de ^{40}K estiveram no intervalo de < 2,3 a 11 Bq/kg. As concentrações de ^{222}Rn nas amostras de ar alcançaram 3.153 Bq/m³ na seção balneológica da piscina emanatória coletiva. Estes resultados foram utilizados para se avaliar a exposição ocupacional e dos indivíduos do público que se utilizam dos banhos termais e da ingestão de águas minerais. Doses efetivas comprometidas de até $2,3 \times 10^{-1}$ mSv/a foram estimadas para os pacientes considerando-se a vias de irradiação interna, enquanto que as doses efetivas comprometidas ocupacionais alcançaram 0,9 mSv/a.

I. INTRODUÇÃO

Devido ao fato de várias fontes de águas minerais e/ou termais conterem concentrações relativamente altas de ^{226}Ra e ^{222}Rn originalmente dissolvidos [1,2] e serem utilizadas em muitos estabelecimentos ao redor do mundo em práticas terapêuticas, a estimativa dos possíveis efeitos adversos na saúde humana que podem ocorrer em decorrência da ingestão ou da inalação dos radionuclídeos presentes nestas águas tem sido realizada seguindo-se os princípios de Proteção Radiológica. Deste modo, em vários países estas práticas têm sido avaliadas e revistas [3,4].

A água é uma das vias pela qual os radionuclídeos naturais, principalmente ^{226}Ra e ^{222}Rn , são transferidos ao homem. O ^{226}Ra (meia-vida de 1.600 anos) é formado quando ^{230}Th emite uma partícula-alfa, decaindo seqüencialmente para formar o gás ^{222}Rn (meia-vida de 3,8 dias). Estes radionuclídeos são membros da série radioativa natural do ^{238}U e ambos, ^{226}Ra e ^{222}Rn , apresentam riscos radiológicos. De acordo com o UNSCEAR [5], devido ao comportamento metabólico do rádio ser similar ao do cálcio, mais de 70% do ^{226}Ra assimilado está presente nos ossos e a fração remanescente é distribuída uniformemente nos tecidos moles. O ^{222}Rn é considerado um radionuclídeo crítico devido à sua retenção nos pulmões na forma dos

filhos ^{210}Pb e ^{210}Po , emissores de partículas alfa, após a inalação.

Várias fontes minerais geotermiais apresentando atividades elevadas de ^{226}Ra e ^{222}Rn , como por exemplo Badgastein na Áustria, Tuwa na Índia, Misasa no Japão, entre muitas outras, têm sido empregadas em todo o mundo no tratamento de algumas doenças em estabelecimentos conhecidos como "Termas" ou "Spas" [3,4, 6-11].

Atualmente, a avaliação risco/benefício das práticas médicas desenvolvidas nos "Spas" que utilizam águas minerais radioativas, lamas sulfurosas e salas emanatórias com atmosferas apresentando concentrações elevadas de ^{222}Rn e filhos ou, ainda, ^{220}Rn e filhos, têm merecido muitos estudos em consequência da falta de evidências científicas comprovadas da relação dose-efeito a baixas doses e taxas de dose [3, 12-15].

Altas concentrações de ^{222}Rn e seus produtos de decaimento de meia-vida curta têm sido detectadas nas atmosferas dos "Spas" que utilizam águas minerais radioativas e somente em poucos países tem-se efetuado estimativas das doses recebidas pelos pacientes que freqüentam os locais e pelos indivíduos ocupacionalmente expostos. Esta preocupação é consequência do elevado índice de casos de câncer observados na década de 1980 em

trabalhadores de minas subterrâneas de carvão e de urânio, decorrente da exposição prolongada ao ^{222}Rn [3, 12].

Deve-se ressaltar, contudo, que em relação às práticas terapêuticas baseadas na ingestão de água mineral radioativa, banhos termais de imersão e uso de lamas medicinais, outros radionuclídeos naturais das séries do ^{238}U , do ^{232}Th e ^{40}K , quando presentes, podem ser de importância relevante, pois contribuem em grande parte para a irradiação interna e externa dos indivíduos. No entanto, devido ao fato de o ^{222}Rn estar geralmente presente em concentrações bem mais altas quando comparado com os demais radionuclídeos, ele é o que freqüentemente mais contribui para a dose efetiva comprometida no homem e para o risco de câncer advindos destas atividades.

No Brasil, existem várias estâncias hidrominerais que desenvolvem a medicina hidrológica e dentre as mais conhecidas e mais freqüentadas, podemos citar a de Araxá e a de Poços de Caldas, que se localizam em algumas das regiões de maior radiação de fundo no país. Até hoje, as estâncias hidrominerais brasileiras, com poucas exceções, por falta de pesquisas têm por si somente o critério clínico dos médicos termalistas ou a prova empírica da eficiência de suas fontes minerais [16].

O presente trabalho tem por finalidade avaliar a exposição associada a baixas doses de radiação ionizante proveniente de radionuclídeos das séries naturais do ^{238}U e do ^{232}Th , relacionadas às práticas terapêuticas desenvolvidas em um balneário hidrotermal do Brasil. Embora o problema já tenha sido investigado em vários países onde comumente se utilizam essas águas minerais radioativas no tratamento coadjuvante de muitas doenças, praticamente não existem dados que se referem às “Termas” ou “Spas” existentes em nosso país.

O local escolhido para o desenvolvimento deste trabalho foi as Termas de Araxá, situada no complexo carbonatítico do Barreiro, localizado na província geográfica do Alto Parnaíba, em Araxá (MG), que está geologicamente relacionado com rochas alcalinas. Existem em Araxá depósitos importantes de pirocloro, fosfato (apatita) e de barita. Nesta região também se observa a presença de urânio associado ao pirocloro e de monazita à apatita. Monazita e gorceixita/goyazita são os principais fosfatos portadores de terras raras [17,18]. Estes minerais constituem a principal fonte de radionuclídeos naturais das séries do ^{238}U e do ^{232}Th , que se incorporaram às águas subterrâneas alcalino-sulfurosas e radioativas observadas no Complexo do Barreiro.

Atualmente, as Termas de Araxá funcionam como um centro terapêutico e de lazer. Alguns tratamentos na área de dermatologia, reumatologia e traumatologia têm sido estabelecidos. A duração dos tratamentos é, em média, de 21 dias, existindo um intervalo de duração mínimo de 10 dias. O tratamento convencional inclui banhos de imersão (Banho Pérola e Hidromassagem) em água mineral sulfurosa, em água mineral radioativa e em lama sulfurosa. A temperatura dos banhos varia de 34 a 37°C. Os banhos com água mineral radioativa e água sulfurosa têm 20 minutos de duração; os banhos de lama sulfurosa duram aproximadamente 1 hora. Além destes banhos, existe uma piscina emanatória coletiva, com água mineral radioativa aquecida à temperatura de

37°C. Esta piscina é utilizada para relaxamento e para terapia de reabilitação de funções motoras.

Também tem sido adotada, em alguns casos, a prática de ingestão de água mineral radioativa e de água mineral sulfurosa.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

As medidas das concentrações de atividade de ^{226}Ra e de ^{228}Ra nas amostras de água mineral coletadas nas Termas de Araxá, no período de Agosto/1998 a Maio/1999, foram realizadas pelas contagens alfa e beta total de um precipitado de $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$, em um detector proporcional de fluxo gasoso de baixa radiação de fundo. As amostras de água mineral foram pré-concentradas por evaporação, de 5 L para 1 L. Os isótopos ^{226}Ra e ^{228}Ra foram determinados por coprecipitação com sulfato de bário em pH 4,5 – 5,0 na presença de EDTA, depois da separação radioquímica de seus filhos por complexação com NTA em pH 12,5 – 13,0 [19]. O rendimento químico gravimétrico obtido para a precipitação do $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ foi de $(90\pm 5)\%$. As amostras de $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ foram medidas 21 dias após a separação radioquímica. Os respectivos limites inferiores de detecção obtidos para a metodologia foram de 2,2 mBq/L para ^{226}Ra e de 3,7 mBq/L para ^{228}Ra , para um nível de confiança de 95% [19].

A determinação das concentrações de ^{222}Rn nas amostras de água mineral foi realizada por cintilação líquida [20]. No instante da coleta, foram adicionados 10 mL da amostra de água em um vial com 25 mL de capacidade, o qual continha 10 mL da solução cintiladora Instagel XF. Após a agitação, obteve-se uma amostra homogênea e o vial foi levado ao espectrômetro de cintilação líquida Tri-Carb 2100 TR, no qual cada amostra foi medida por cerca de 30 minutos. O limite inferior de detecção para ^{222}Rn utilizando-se esta metodologia foi cerca de 0,18 Bq/L [20]. As amostras foram analisadas em duplicata.

A determinação das concentrações de ^{222}Rn nas amostras de ar foi realizada com o auxílio de um monitor portátil modelo RDA-200, marca Scintrex. Seu princípio de funcionamento é baseado no método de Kusnetz modificado [21]. Uma célula de cintilação com 2 conectores Swagelock foi conectada a uma bomba amostradora de ar e a um suporte para papel de filtro. O fluxômetro da bomba amostradora foi calibrado para o nível de 2L/min e a amostragem de ar foi efetuada por 10 minutos. A medida da célula de cintilação foi realizada após cerca de 3 horas da coleta das amostras de ar, no detector RDA-200, durante 30 minutos. Estas medidas forneceram as concentrações de ^{222}Rn no ar, em Bq/m^3 .

A determinação das concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{226}Ra foi realizada em um volume de 850 mL da amostra de banho de lama sulfurosa (uma mistura de água mineral sulfurosa e lama sulfurosa bruta), que foi coletado diretamente da banheira com uma proveta graduada e transferido para um frasco tipo Marinelli e selado. Após um intervalo de 30 dias, tendo sido atingido o equilíbrio radioativo, as atividades de ^{40}K , ^{232}Th e ^{226}Ra foram medidas por espectrometria gama em um detector de germânio hiperpuro com eficiência de 15%, EG&G GEM-15200, por

150.000 segundos. O detector foi calibrado com soluções de referência certificadas pela Amersham. As concentrações de atividade de ^{226}Ra foram obtidas pelo cálculo da atividade média de três fotopicos originários de seus produtos de decaimento: ^{214}Pb em 295,2 keV e 351,9 keV e ^{214}Bi em 609,3 keV. As concentrações de atividade de ^{232}Th foram obtidas pelos fotopicos de 911 keV e 968 keV do ^{228}Ac . A atividade de ^{40}K foi determinada pelo fotopico de 1.460 keV. Todas as amostras foram analisadas em triplicata.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As concentrações de atividade de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{222}Rn determinadas nas águas minerais utilizadas em terapia termal nas Termas de Araxá, estudadas no período de Agosto/1998 a Maio/1999, são apresentadas na Tabela 1. As concentrações de ^{226}Ra e de ^{228}Ra variaram de 54 a 98 mBq/L e de 87 a 148 mBq/L, respectivamente. As concentrações de ^{222}Rn determinadas nas mesmas águas estiveram no intervalo de 107 a 657 Bq/L. As maiores atividades de ^{226}Ra e de ^{222}Rn foram observadas na água mineral da Fonte Dona Beja, enquanto as concentrações mais altas de ^{228}Ra foram determinadas na água mineral sulfurosa da Fonte Andrade Júnior. Considerando-se todas as amostras de água mineral analisadas, freqüentemente consumidas por pacientes e pelos residentes locais, em nenhum caso a concentração de ^{226}Ra excedeu o nível de contaminação máxima estabelecido pela EPA de 185 mBq/L [22]. Além disso, levando-se em conta as concentrações de ^{226}Ra obtidas nas águas minerais estudadas, em nenhum caso o limite de referência de 0,1 Bq/L para a atividade alfa total estabelecido no Brasil pelo Ministério da Saúde [23] foi ultrapassado.

As concentrações de ^{226}Ra obtidas nas águas minerais das Termas de Araxá são ligeiramente menores que aquelas obtidas pelo mesmo autor [24] em águas minerais provenientes do Planalto de Poços de Caldas.

As concentrações de ^{222}Rn determinadas nas águas minerais das Termas de Araxá são da mesma ordem de grandeza daquelas observadas por Doretti e colaboradores [9], em águas minerais utilizadas em terapia termal nas Termas de Abano (Itália), e daquelas observadas por Trabidou e colaboradores [10], no estabelecimento termal de Ikaria Island (Grécia).

As concentrações de atividade de ^{40}K , ^{226}Ra e ^{232}Th determinadas nas amostras de banho de lama sulfurosa, estudadas no mesmo período, são apresentadas na Tabela 2. As concentrações de ^{40}K variaram de < 2,3 a 11 Bq/kg, as concentrações de ^{226}Ra variaram de < 0,3 a 1,0 Bq/kg e as concentrações de ^{232}Th estiveram no intervalo de 0,7 a 1,0

Bq/kg, respectivamente. Estas concentrações são menores que aquelas determinadas por Doretti e colaboradores [9], em amostras de lama coletadas na região do complexo termal de Abano (Itália).

A taxa de dose recebida por um paciente que utiliza o banho de lama sulfurosa foi estimada empregando-se os fatores de conversão de dose calculados por Becker e colaboradores [25] e a seguinte equação:

$$D = 0,048 C_K + 0,49 C_{Ra} + 0,76 C_{Th} \quad (1)$$

Onde:

C = concentração dos radionuclídeos naturais de interesse ^{40}K , ^{226}Ra e ^{232}Th , respectivamente (Bq/kg).

D = taxa de dose (nSv/h).

Assim, a taxa de dose recebida por um indivíduo que realiza um banho de lama sulfurosa é cerca de 0,2 $\mu\text{Sv/a}$. Este valor é similar ao obtido no trabalho de Doretti e colaboradores [9], nos banhos de lama empregados em terapia termal nas Termas de Abano (Itália)

As concentrações de ^{222}Rn determinadas em amostras de ar coletadas no interior das Termas de Araxá, em quatro seções balneológicas diferentes, e as respectivas doses efetivas comprometidas devido à inalação de ^{222}Rn são apresentadas na Tabela 3.

As concentrações de radônio no ar variam amplamente, dependendo do local. De acordo com Lettner e colaboradores [26], as concentrações de ^{222}Rn em Spas na Áustria variam de 10 a 3.300 Bq/m³. Sciocchetti e colaboradores [27], determinaram concentrações de ^{222}Rn na Itália variando de 0,44 a 514 kBq/m³. Kopal e Renier [8], observaram concentrações de ^{222}Rn de até 190 Bq/m³ no Spa de Podcetrtek, na Slovênia. Neste trabalho, as maiores concentrações de ^{222}Rn no interior das Termas de Araxá foram observadas na seção balneológica da piscina emanatória coletiva, que utiliza água mineral radioativa da Fonte Dona Beja. Estes valores são da mesma ordem de grandeza daqueles observados em Spas na Áustria.

Em virtude das concentrações de ^{222}Rn determinadas na seção balneológica da piscina emanatória coletiva serem relativamente altas, os trabalhadores deste local podem estar expostos a concentrações consideráveis de radônio e filhos durante o período de execução de suas atividades. Entretanto, as doses ocupacionais devido à inalação de ^{222}Rn apresentadas na Tabela 3 não excederam o limite de 50 mSv/a recomendado para trabalhadores pelo ICRP [28,29]. Considerando-se as concentrações médias aritméticas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e de ^{222}Rn determinadas nas fontes Dona Beja e Andrade Júnior, foram estimadas as doses efetivas comprometidas

Tabela 1. Concentrações de atividade médias de ^{222}Rn , ^{226}Ra e ^{228}Ra determinadas nas águas minerais das Termas de Araxá (Agosto/1998 a Maio/1999).

Amostra	^{222}Rn (Bq/L)	^{226}Ra (mBq/L)	^{228}Ra (mBq/L)
Fonte Dona Beja	(7)	(3)	(3)
Água Mineral Radioativa			
Intervalo de Concentração	433 – 657	90 – 99	87 – 93
Média Aritmética	530 ± 95	96 ± 4	90 ± 4
Fonte Andrade Júnior	(6)	(4)	(3)
Água Mineral Sulfurosa			
Intervalo de Concentração	107 – 124	54 – 71	135 – 148
Média Aritmética	116 ± 7	62 ± 7	142 ± 9
Banho Pérola	(6)	(4)	(4)
Água Mineral Radioativa			
Intervalo de Concentração	470 – 612	82 – 96	94 – 116
Média Aritmética	534 ± 59	90 ± 6	104 ± 11
Banho Pérola	(6)	(4)	(4)
Água Mineral Sulfurosa			
Intervalo de Concentração	32 – 39	56 – 72	136 – 173
Média Aritmética	36 ± 3	66 ± 7	156 ± 18
Piscina Emanatória	(6)	(4)	(4)
Água Mineral Radioativa			
Intervalo de Concentração	148 – 505	75 – 88	89 – 136
Média Aritmética	331 ± 153	79 ± 6	117 ± 21

(n) = número de amostras analisadas.

Tabela 2. Concentrações de atividade de ^{40}K , ^{226}Ra e ^{232}Th determinadas no banho de lama sulfurosa, por espectrometria gama (Agosto/1998 a Maio/1999).

	^{40}K (8)	^{226}Ra (8)	^{232}Th (8)
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
Banho de Lama Sulfurosa			
Intervalo de Concentração	< 2,3 – 11	< 0,3 – 1,0	< 0,6 – 1,0
Média Aritmética	$4,3 \pm 3,2$	$0,5 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$

(n) = número de amostras analisadas

Tabela 3. Concentrações de ^{222}Rn no ar do interior das Termas de Araxá e respectivas doses efetivas comprometidas devido à inalação (Agosto/1998 a Maio/1999).

Local de Amostragem	^{222}Rn (Bq/m ³)	$\text{He } ^{222}\text{Rn}$ (mSv/a)	
		Pacientes	Trabalhadores
Sala de Banho Pérola	686	$2,1 \times 10^{-2}$	0,3
Água Mineral Radioativa			
Sala de Banho Pérola	811	$1,4 \times 10^{-2}$	0,2
Água Mineral Sulfurosa	100		
Piscina Emanatória	3,153	$7,6 \times 10^{-2}$	0,9
Água Mineral Radioativa	1,861		
Sala de Banho de Lama	557	$1,2 \times 10^{-3}$	0,1
Sulfurosa	238		

Tabela 4. Estimativa das doses recebidas pelos pacientes e pelos habitantes da região devido à ingestão de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{222}Rn presentes nas águas minerais da Fonte Dona Beja e Fonte Andrade Júnior

Amostra	Pacientes	Habitantes da Região
	Dose efetiva comprometida (mSv/a)	Dose efetiva comprometida (mSv/a)
Fonte Dona Beja		
Água Mineral Radioativa		
^{226}Ra	$1,1 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-2}$
^{228}Ra	$2,5 \times 10^{-3}$	$4,4 \times 10^{-2}$
^{222}Rn	$2,3 \times 10^{-1}$	3,9
Fonte Andrade Júnior		
Água Mineral Sulfurosa		
^{226}Ra	$7,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-2}$
^{228}Ra	$3,9 \times 10^{-3}$	$6,8 \times 10^{-2}$
^{222}Rn	$4,9 \times 10^{-2}$	$8,5 \times 10^{-1}$

devido à ingestão das mesmas. No caso dos pacientes que freqüentam as Termas de Araxá, as doses foram calculadas considerando-se uma taxa de ingestão de água mineral de 2 L/d e um período de tratamento de 21 dias. Para o cálculo das doses recebidas pelos habitantes da região, que consomem freqüentemente as águas estudadas, a mesma taxa de ingestão de água foi considerada. Os fatores de conversão de dose efetiva comprometida para a ingestão de ^{226}Ra e ^{228}Ra , foram extraídos do ICRP 67 [30], considerando-se o metabolismo de um adulto e um intervalo de tempo para integração da dose efetiva de 50 anos após uma incorporação aguda de ^{226}Ra e ^{228}Ra . Para a ingestão de ^{222}Rn , o fator de conversão de dose efetiva comprometida foi de 10^{-8} Sv/Bq [31]. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Foram estimadas para os pacientes doses efetivas comprometidas de até $1,1 \times 10^{-3}$ mSv/a, $3,9 \times 10^{-3}$ mSv/a e $2,3 \times 10^{-1}$ mSv/a, considerando-se a ingestão de ^{226}Ra , ^{228}Ra e de ^{222}Rn , respectivamente.

Considerando-se o consumo das águas minerais estudadas pelos habitantes da região, foram determinadas doses efetivas comprometidas de até $2,0 \times 10^{-2}$ mSv/a, $6,8 \times 10^{-2}$ mSv/a e 3,9 mSv/a devido à ingestão de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{222}Rn , respectivamente.

Agradecimentos - Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo-FAPESP, pela concessão de um Auxílio à Pesquisa (Processo nº 1998/12256-8). Além disso, gostaríamos de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq, pela concessão de uma bolsa de Produtividade em Pesquisa no País (Processo nº 300835/95-7).

REFERÊNCIAS

- [1] Kobal, I., Kristan, J., Ancik, M., Jerancic, S., Sklofjanec, M., **Radioactivity of thermal and mineral springs in Slovenia**, Health Physics, vol. 37(August), p 239-242, 1979.
- [2] Eisenbud, M., **Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources**, Academic Press, California, 1987.
- [3] Uzunov, I., Steinhausler, F., Pohl, E., **Carcinogenic risk of exposure to Radon Daughters associated with Radon Spas**, Health Physics, vol. 41(6), p 807-813, 1981.
- [4] Marinovic, G., Sencar, J., Franic, Z., Lokobauer, N., **Radium-226 in thermal and mineral springs of Croatia and associated health risks**, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 33(3), p 309-317, 1996.
- [5] UNSCEAR, **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Report to the General Assembly, United Nations, New York, 1993.
- [6] Morinaga, H., Mifune, M., Furuno, K., **Radioactivity of water and air in Misasa Spa, Japan**, Radiation Protection Dosimetry, vol. 7, p 295-297, 1984.
- [7] Kobal, I., Fedina, S., **Radiation doses at Radenci Health Resort**, Radiation Protection Dosimetry, vol. 20(4), p 257-259, 1987.
- [8] Kobal, I., Renier, A., **Radioactivity of the Atomic Spa at Podcetrtek, Slovenia, Yugoslavia**, Health Physics, vol. 53(3), p 307-310, 1987.
- [9] Doretta, L., Ferrara, D., Barison, G., Gerbasi, R., Battiston, G., **Natural radionuclides in muds and waters used in thermal therapy in Abano Terme, Italy**, Radiation Protection Dosimetry, vol. 45(1/4), p 175-178, 1992.
- [10] Trabidou, G., Florou, H., Angelopoulos, A., Sakelliou, L., **Environmental study of the radioactivity of the Spas in the Island of Ikaria**, Radiation Protection Dosimetry, vol. 63(1), p 63-67, 1995.
- [11] Sanchez, A.M., Tomé, F.V., Quintana, R.M.O., Escobar, V.G., Vargas, M.J., **Gamma and alpha spectrometry for natural radioactive nuclides in the Spa waters of Extremadura (Spain)**, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 28(2), p 209-220, 1995.

- [12] Steinhausler, F., **Radon Spas: source term, doses and risk assessment**, Radiation Protection Dosimetry, vol. 24(1/4), p 257-259, 1988.
- [13] Frame, P.W., **Natural radioactivity in curative devices and Spas**, Health Physics, vol. 61(6), p 580-582, 1992.
- [14] Haque, A.K.M.M., Kirk, A.E., **Environmental Radon and Cancer Risk**, Radiation Protection Dosimetry, vol. 45(1/4), p 639-642, 1992.
- [15] Doll, R., **Risks from Radon**, Radiation Protection Dosimetry, vol. 42(3), p 149-153, 1992.
- [16] Mourão, B.M., **Medicina Hidrológica: moderna terapêutica das águas minerais e estâncias de cura**, Sociedade Brasileira de Termalismo, Poços de Caldas, MG, Brasil, 1992.
- [17] Issa Filho, A., Lima, P.R.A.S., Souza, O.M., **Aspectos da geologia do Complexo Carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil**, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, São Paulo, 1984.
- [18] COMIG/CPRM-Serviço Geológico do Brasil, **Projeto Araxá, Estudo Geoambiental das Fontes Hidrominerais**, Superintendência Regional de Belo Horizonte, Belo Horizonte, Minas Gerais, 1998.
- [19] Oliveira, J., **Determinação de ^{226}Ra e de ^{228}Ra em águas minerais da região de Águas da Prata**, Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1993.
- [20] Sampa, M.H.O., **Estudo e desenvolvimento de métodos analíticos para a determinação de radioatividade natural em águas**, Dissertação de Mestrado, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, 1979.
- [21] Environmental Protection Agency-EPA, **Indoor Radon and Radon Decay Product Measurement Protocols**, EPA-520/1-89-009, Washington, D.C., 1989.
- [22] Environmental Protection Agency-EPA, **Final Draft for the Drinking Water Criteria Document on Radium**, TR-1241-85, Washington, D.C., 1991.
- [23] Ministério da Saúde, **Normas e Padrão de Potabilidade de Água Destinada ao Consumo Humano**, Portaria n° 36/GM, 1990.
- [24] Oliveira, J., Moreira, S.R.D., Mazzilli, B.P., **Natural radioactivity in mineral spring waters of a highly radioactive region of Brazil and consequent population doses**, Radiation Protection Dosimetry, vol. 55(1), p 57-59, 1994.
- [25] Becker, H.L., De Camp, J., Gogolack, C., **In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry**, Report HASL-258, New York, 1972.
- [26] Lettner, H., Humber, A.K., Rolle, R., Steinhausler, F., **Occupational exposure to radon in treatment facilities of the radon-spa Badgastein, Austria**, Environ.Int., vol. 22(suppl.1), p S399-S407, 1996.
- [27] Sciocchetti, G., Tosti, S., Baldassini, P.G., Sarao, R., Soldano, E., **Dose assessment of population groups exposed to elevated radon levels in radioactive Spas**, Proc. Of 29th Hanford Symposium on Health and Environment – Indoor radon and lung cancer: reality or myth?, FT Cross ed., p 37-49, 1990.
- [28] International Commission on Radiological Protection-ICRP, **Limits for Inhalation of Radon Daughters by Workers**, ICRP Publication 32, Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [29] International Commission on Radiological Protection-ICRP, **Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters**, ICRP Publication 50, Pergamon Press, Oxford, 1987.
- [30] International Commission on Radiological Protection-ICRP, **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients**, ICRP Publication 67, Pergamon Press, Oxford, 1993.
- [31] Kendall, G.M., Fell, T.P., Phipps, A.W., **A model to evaluate doses from radon in drinking water**, Radiological Protection Bulletin, vol. 97, p 7-8, 1988.

ABSTRACT

This paper reports a study concerning the determination of natural radionuclides (^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{222}Rn) in samples of radioactive spring water, sulphurous mineral water, mud and indoor air collected at Termas de Araxá (MG), Brazil. This spa is located in one of the highest natural radioactive regions of Brazil. In spring waters used in thermal treatments, high levels of dissolved radon up to 657 Bq/L were found. The activity concentrations of ^{226}Ra and ^{228}Ra in the same waters varied from 54 to 99 mBq/L and from 87 to 173 mBq/L, respectively. Bathing mud measurements showed activity concentrations from 0.7 to 1.0 Bq/kg for ^{232}Th , from <0.3 to 1.0 Bq/kg for ^{226}Ra and from < 2.3 to 11 Bq/kg for ^{40}K . ^{222}Rn airborne activities up to 3,153 Bq/m³ were observed at the swimming pool room. The results obtained were used to assess the natural radiation exposure to patients and personnel. Committed effective doses up to 2.3×10^{-1} mSv/y were obtained for internal irradiation for the patients, while committed effective doses up to 0.9 mSv/y were determined for the personnel occupationally exposed.