AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Dosimetria de ^{222}Rn no ar do balneário municipal de Águas de Lindóia e do balneário
Thermas Antônio Carlos**

GUILHERME DE LIMA REIS

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Barbara Paci Mazzilli**

**São Paulo
2019**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Dosimetria de ^{222}Rn no ar do balneário municipal de Águas de Lindóia e do balneário
Thermas Antônio Carlos**

GUILHERME DE LIMA REIS

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Barbara Paci Mazzilli**

Versão Corrigida

**São Paulo
2019**

Fonte de Financiamento: CNPq, processo nº 131801/2017-1

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

DE LIMA REIS, G. . ***Dosimetria de ^{222}Rn no ar do balneário municipal de Águas de Lindóia e do balneário Thermas Antônio Carlos***. 2019. 63 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

de Lima Reis, Guilherme
Dosimetria de ^{222}Rn no ar do balneário municipal de Águas
de Lindóia e do balneário Thermas Antônio Carlos / Guilherme
de Lima Reis; orientador Dra. Barbara Paci Mazzilli. -- São
Paulo, 2019.
63 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Radônio 222. 2. Radioisótopos . 3. Radiatividade
Natural. 4. Balneários . 5. Spas. I. Paci Mazzilli, Dra.
Barbara , orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

GUILHERME DE LIMA REIS

DOSIMETRIA DE ^{222}RN NO AR DO BALNEÁRIO MUNICIPAL DE ÁGUAS DE
LINDÓIA E DO BALNEÁRIO THERMAS ANTÔNIO CARLOS

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Data: 12/06/2019

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Paulo Sergio Cardoso da Silva

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof. Dra.: Adir Janete Godoy dos Santos

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof. Dra.: Andreza Portella Ribeiro

Instituição: _____ Julgamento: _____

Dedico este trabalho a Deus:

Pois sem Ele, nada seria possível e nada existiria. Obrigado

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por tudo que já fez por mim, ao longo destes anos.

Aos meus pais, minha irmã e minha família que nunca descreditaram dos meus sonhos e anseios.

À minha esposa Polyana, por me aguentar e suportar ao longo deste processo, obrigado.

Ao padre Fernando, ao sr. Marcos e a dona Clarice, que desde antes do início da graduação, já depositavam esperança e mim.

À Dra. Bárbara P. Mazzilli pelas orientações e sugestões ao longo do trabalho.

À Dra. Márcia P. Campos por me acompanhar desde a graduação, pela orientação na iniciação científica e por todo o apoio para que este trabalho se desenvolvesse, obrigado.

Ao Dr. Paulo S. Cardoso, pelas viagens a campo, pelas informações dadas e principalmente pelo amparo dado ao longo do trabalho.

Ao Dr. Marcelo Bessa, pelos inúmeros conselhos dados ao longo destes anos e a Dra. Cátia Saueia pelos auxílios no laboratório.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela oportunidade de fazer este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudos que tornou possível a realização deste trabalho.

Aos responsáveis pelo balneário municipal de Águas de Lindóia e pelo balneário Thermas Antônio Carlos, por autorizarem e permitirem a coleta dos dados necessários para a realização deste trabalho.

Aos colegas de laboratório e salas de aula, que ao longo do trabalho foram dando motivação e encorajamento.

A tantos outros que participaram diretamente ou indiretamente desta dissertação, aos que ainda irão ler e utilizá-la como referência e, não menos importante, agradeço a mim pela persistência e dedicação para que este trabalho se desenvolvesse, as imensuráveis xicaras de café e garrafas de mate que foram necessárias para ficar desperto. Obrigado!

“É necessário sempre acreditar que um sonho é possível, que o céu é o limite e você truta é imbatível”.

Racionais Mc's – A Vida é um Desafio

REIS, G. L. ***Dosimetria de ^{222}Rn no ar do balneário municipal de Águas de Lindóia e do balneário Thermas Antônio Carlos***. 2019. 63 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN CNEN/SP, São Paulo.

RESUMO

O ser humano está constantemente exposto a diversas fontes de radiação. Dentre elas, destacam-se as fontes naturais, que atingem a população mundial a uma taxa relativamente constante durante um longo período de tempo. Estima-se que a dose anual média recebida pela população devido às fontes naturais seja de $2,4 \text{ mSv a}^{-1}$. Alguns balneários e spas encontrados pelo mundo são de grande importância quando se consideram os aspectos de proteção radiológica, pois concentram concentrações significativas de radionuclídeos, como por exemplo, o gás ^{222}Rn . Embasado nisto, foi realizada a dosimetria de Rn^{222} no ar para trabalhadores e indivíduos do público em dois balneários brasileiros, o balneário municipal de Águas de Lindóia no estado de São Paulo e o balneário Thermas Antônio Carlos, na cidade de Poços de Caldas, estado de Minas Gerais. Utilizou-se o método de detecção passiva, com o uso de detectores sólidos de traços do tipo CR-39[®] (*Columbia Resin*) inseridos em câmaras de difusão do tipo NRBP[®] (*National Radiological Protection Board*). As concentrações de Rn^{222} no ar variaram de $27 \pm 4 \text{ Bq m}^{-3}$ a $16451 \pm 298 \text{ Bq m}^{-3}$ para o balneário municipal de Águas de Lindóia e de $35 \pm 3 \text{ Bq m}^{-3}$ a $156 \pm 4 \text{ Bq m}^{-3}$ para o balneário Thermas Antônio Carlos. Foram considerados três cenários de exposição para a avaliação de dose nos dois balneários. O primeiro cenário corresponde à exposição dos trabalhadores que aplicam os banhos termais nos usuários, o segundo cenário corresponde à exposição dos trabalhadores que realizam manutenções nas fontes termais e o terceiro cenário abrange os frequentadores assíduos dos banhos termais. Os valores de dose efetiva encontrados no balneário municipal de Águas de Lindóia e no balneário Thermas Antônio Carlos, respectivamente, considerando o 1º cenário variam de $0,10$ a $0,34 \text{ mSv a}^{-1}$ e $0,17$ a $0,33 \text{ mSv a}^{-1}$. Os valores encontrados, considerando o 2º cenário variam de $0,24$ a $9,9 \text{ mSv a}^{-1}$ para o balneário municipal

de Águas de Lindóia e de 0,03 a 0,09 mSv a⁻¹ para o balneário Thermas Antônio Carlos. Considerando o 3º cenário, os valores de dose encontrados variam de 0,01 a 0,02 mSv a⁻¹ para ambos balneários.

Palavras-chave: Radionuclídeos naturais, radônio, balneários, detector sólido de traços.

REIS, G. L. ***Dosimetry ^{222}Rn in the air of the municipal spa of Águas de Lindóia e of spa Thermas Antônio Carlos***. 2019. 63 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN CNEN/SP, São Paulo.

ABSTRACT

Human beings are constantly exposed to different sources of radiation. Among them, the natural sources, which reach the world's population at a relatively constant rate for a long period of time, are highlighted. It is estimated that the average annual dose received by the population due to natural sources is 2.4 mSv y^{-1} . Some bathhouses and spas found around the world are of great importance when considering the aspects of radiological protection, because they concentrate significant concentrations of radionuclides, for instance, the ^{222}Rn gas. Based on this, the dosimetry of ^{222}Rn in the air was performed for workers and individuals of the public in two brazilian bathhouses; Águas de Lindóia municipal bathhouse in the state of São Paulo and Thermas Antônio Carlos bathhouse in the city of Poços de Caldas, state of Minas Gerais. The passive detection method was used, with the use of solid detectors of type CR-39[®] (*Columbia Resin*) inserted in diffusion chambers of the type NRB[®] (*National Radiological Protection Board*). The concentrations of ^{222}Rn in the air ranged from $27 \pm 4 \text{ Bq m}^{-3}$ to $16451 \pm 298 \text{ Bq m}^{-3}$ for the Águas de Lindóia Municipal bathhouse and $35 \pm 3 \text{ Bq m}^{-3}$ to $156 \pm 4 \text{ Bq m}^{-3}$ for the Thermas Antônio Carlos bathhouse. Three exposure scenarios were considered for the dose assessment in both bathhouses. The first scenario corresponds to the exposure of workers who apply thermal baths to users, the second scenario corresponds to the exposure of workers who perform maintenance in the hot springs and the third scenario covers the assiduous regulars of the thermal baths. The effective dose values found in the Águas de Lindóia Municipal bathhouse and in the Thermas Antônio Carlos bathhouse, respectively, considering the first scenario range from 0.10 to 0.34 mSv y^{-1} and 0.17 to 0.33 mSv y^{-1} . The value found, considering the second scenario range from 0.24 to 9.9 mSv y^{-1} to the Águas de Lindóia bathhouse and from 0.03 to 0.09 mSv y^{-1} to the Thermas Antônio Carlos bathhouse.

Considering the third scenario, the dose values found range from 0.01 to 0.02 mSv y⁻¹ for both bathhouses.

Keywords: natural radionuclides, radon, bathhouses, solid trace detector.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	<i>Radônio e Suas Características</i>	<i>19</i>
1.2	<i>Efeitos do Radônio em Ambientes Fechados</i>	<i>20</i>
2.	JUSTIFICATIVA	23
3.	OBJETIVOS	26
4.	METODOLOGIA.....	27
4.1	<i>Método de Detecção de Rn^{222} no Ar</i>	<i>27</i>
4.2	<i>Método de Detecção Passiva</i>	<i>28</i>
4.2.1	<i>Detectores de Carvão Ativado</i>	<i>28</i>
4.2.2	<i>Câmara de Ionização de Eletreto</i>	<i>28</i>
4.2.3	<i>Detectores Sólidos de Traços Nucleares</i>	<i>29</i>
4.3	<i>Determinação da Concentração de Rn^{222} no Ar com Detectores de Traços .</i>	<i>31</i>
4.4	<i>Avaliação de Dose Efetiva Devido à Inalação do Rn^{222}</i>	<i>32</i>
4.5	<i>Níveis de Referência para Concentração de Rn^{222} no Ar</i>	<i>34</i>
5.	PARTE EXPERIMENTAL.....	35
5.1	<i>Áreas de Estudo</i>	<i>35</i>
5.2	<i>Postos de Amostragem</i>	<i>36</i>
5.2.1	<i>Balneário Municipal de Águas de Lindóia</i>	<i>36</i>
5.2.2	<i>Balneário Thermas Antônio Carlos</i>	<i>39</i>
5.3	<i>Montagem das Câmaras de Difusão</i>	<i>40</i>
5.4	<i>Determinação da Concentração de Rn^{222} no Ar</i>	<i>41</i>

6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
6.1	<i>Concentrações de Rn^{222} no Ar do Balneário Municipal de Águas de Lindóia</i>	44
6.2	<i>Dose Efetiva de Radiação Devido a Inalação do Rn^{222} no Balneário Municipal de Águas de Lindóia</i>	<i>47</i>
6.3	<i>Concentrações de Rn^{222} no Ar do Balneário Thermas Antônio Carlos</i>	<i>51</i>
6.4	<i>Dose Efetiva de Radiação Devido a Inalação do Rn^{222} no Balneário Thermas Antônio Carlos</i>	<i>53</i>
7.	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Contribuição de vários tipos de fontes de radiação para a dose recebida pelo homem (Adaptado do UNSCEAR, 2000)	16
Figura 2 – Série radioativa do ^{238}U , bem como suas desintegrações (adaptado do IAEA, 2014)	17
Figura 3 – Traços na superfície do detector LR-115 [®] (Cazula, 2015)	30
Figura 4 – Traços na superfície do detector Makrofol [®] (Cazula, 2015)	30
Figura 5 – Traços na superfície do detector Durodon [®] (Cazula, 2015)	30
Figura 6 – Traços na superfície do detector CR-39 [®] (Cazula, 2015)	30
Figura 7 – (a) Detectores expostos dentro da “fonte Filomena”. (b) Vista do alçapão da “fonte Filomena”. (c) Vista superior da entrada da “fonte Filomena” (Acervo pessoal, 2017)	36
Figura 8 – (a) Detectores expostos dentro da “fonte Curie”. (b) Vista superior da entrada da “fonte Curie” (Acervo pessoal, 2017)	37
Figura 9 – (a) Vista do alçapão da “fonte São Roque”. (b) Detectores expostos dentro da “fonte São Roque” (Acervo pessoal, 2017)	37
Figura 10 – (a) Detectores expostos na sala de banho masculino. (b) Detectores expostos na sala de banho feminino (Acervo pessoal, 2017)	38
Figura 11 – (a) Vista interior do emanatório “São Roque”. (b) Detectores expostos no emanatório “São Roque” (Acervo pessoal, 2017)	38
Figura 12 – (a) Primeira duplicata de detectores expostos dentro das “3 fontes”. (c) Segunda duplicata de detectores expostos dentro das “3 fontes” (Acervo pessoal, 2017)	39
Figura 13 – detectores expostos dentro das salas de banho (Acervo pessoal, 2017)	39

Figura 14 – (a) Vista lateral da câmara de difusão do tipo NRPB®. (b) Câmara de difusão NRPB® aberta com um SSNTD do tipo CR-39® inserido (Acervo pessoal, 2017)	40
Figura 15 – Arranjo inserido nos pontos de amostragem (Cazula, 2015)	40
Figura 16 – Níveis de concentrações de ^{222}Rn no ar encontrados nas salas de banho, masculino e feminino, e no emanatório São Roque	45
Figura 17 – Níveis de concentrações de ^{222}Rn no ar encontrados nas fontes Filomena, Curie e São Roque	45
Figura 18 – Doses recebidas no balneário municipal de Águas de Lindóia, considerando o 1º cenário.....	50
Figura 19 – Doses recebidas no balneário municipal de Águas de Lindóia, considerando o 2º cenário.....	50
Figura 20 – Doses recebidas no balneário municipal de Águas de Lindóia, considerando o 3º cenário.....	51
Figura 21 – Níveis de concentrações de ^{222}Rn no ar encontrados no balneário Thermas Antônio Carlos, em todos os ambientes estudados	52
Figura 22 – Doses recebidas no balneário Thermas Antônio Carlos, considerando o 1º cenário	55
Figura 23 – Doses recebidas no balneário Thermas Antônio Carlos, considerando o 2º cenário	55
Figura 24 – Doses recebidas no balneário Thermas Antônio Carlos, considerando o 3º cenário	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dose de radiação natural recebida em determinadas altitudes (UNSCEAR, 2000)	18
Tabela 2 – Dose de radiação natural recebida pela população mundial (UNSCEAR, 2000)	18
Tabela 3 – Características radioativas do ^{222}Rn e de seus produtos de decaimento	20
Tabela 4 – Aumento porcentual do risco de câncer de pulmão por 100 Bq m^{-3} de aumento na concentração de radônio (WHO, 2009)	22
Tabela 5 – Detectores de medição de ^{222}Rn no ar mais populares nos países estudados pelo Programa Internacional de Radônio (WHO, 2007)	27
Tabela 6 – Valores empregados na equação para o cálculo da dose efetiva de radiação devido à inalação do ^{222}Rn	33
Tabela 7 – Níveis de concentração de ^{222}Rn no ar utilizados como referência neste trabalho	34
Tabela 8 – Tempo de exposição dos detectores em função do tipo de ambiente no balneário municipal de Águas de Lindóia	41
Tabela 9 – Tempo de exposição dos detectores expostos no ar do balneário “Thermas Antônio Carlos”	42
Tabela 10 – Fator de calibração (k) utilizado para a determinação da concentração de ^{222}Rn no ar (Mayya et al. 1998)	43
Tabela 11 – Concentrações de ^{222}Rn no ar do balneário municipal de Águas de Lindóia	44
Tabela 12 – Valores de concentrações de ^{222}Rn no ar encontrados em diversos balneários pelo mundo	47
Tabela 13 – Cenários utilizados para o cálculo da dose efetiva causada pela inalação do ^{222}Rn no ar de ambos balneários	48

Tabela 14 – Doses de radiação recebidas no balneário considerando o 1º cenário .	49
Tabela 15 – Doses de radiação recebidas no balneário considerando o 2º cenário .	50
Tabela 16 – Doses de radiação recebidas no balneário considerando o 3º cenário .	50
Tabela 17 – Níveis de concentrações de ^{222}Rn no ar encontrados no balneário Thermas Antônio Carlos.....	51
Tabela 18 – Doses de radiação recebidas no balneário considerando o 1º cenário .	53
Tabela 19 – Doses de radiação recebidas no balneário considerando o 2º cenário .	53
Tabela 20 – Doses de radiação recebidas no balneário considerando o 3º cenário .	54

1. INTRODUÇÃO

O ser humano está constantemente exposto a várias fontes de radiação. Excluindo as procedentes de ações antropogênicas, temos a radioatividade natural, que de todas as fontes de radiação recebidas pelo homem é, sem dúvida, a mais importante. Uma característica inerente da radiação natural é que ela atinge toda a população mundial a uma taxa relativamente constante durante um longo período de tempo. Estima-se que a dose anual média decorrente de fontes naturais seja de aproximadamente $2,4 \text{ mSv a}^{-1}$. Segundo o UNSCEAR (*Comité Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica*), há diversos tipos de fontes de radiação que contribuem para a dose recebida pelo homem (UNSCEAR, 2000). A *Figura 1* mostra graficamente a contribuição de vários tipos de fontes de radiação para a dose recebida pelo homem.

Figura 1 – Contribuição de vários tipos de fontes de radiação para a dose recebida pelo homem (Adaptado do UNSCEAR, 2000).

Os radionuclídeos naturais podem ser divididos em dois grupos distintos, de acordo com sua origem. No primeiro grupo há os radionuclídeos cosmogênicos, formados pela interação dos raios cósmicos com a atmosfera terrestre. No segundo grupo, estão radionuclídeos que se originaram na formação da terra, chamados de radionuclídeos primordiais (UNSCEAR, 2008).

Os radionuclídeos primordiais presentes na crosta terrestre são compostos pelo ^{40}K , ^{87}Rb e pelos radionuclídeos das séries radioativas do ^{238}U , com meia vida de $4,47 \times 10^9$ anos, do ^{235}U com meia vida de $7,04 \times 10^8$ anos e do ^{232}Th com meia vida de $1,40 \times 10^{10}$ anos que, após toda uma série de desintegrações, decaem para isótopos estáveis do chumbo (UNSCEAR, 2008).

Em massa, o ^{238}U representa 99,3% do urânio natural encontrado na crosta terrestre. O ^{235}U representa apenas 0,7% do urânio natural. Por sua abundância isotópica, as maiores concentrações de radionuclídeos naturais encontram-se na série radioativa do ^{238}U , sendo em forma de minérios, rochas e minerais (Schobbenhaus, 1984).

Nota-se que a maior dose recebida pelo homem é decorrente de uma fonte natural, o gás radônio. Devido à abundância dos radionuclídeos ^{238}U e ^{226}Ra na superfície da Terra, o ^{222}Rn está continuamente sendo formado no solo e liberado para o ar (Eisenbud, 1987).

A Figura 2 ilustra a série radioativa do ^{238}U e suas desintegrações.

Figura 2 – Série radioativa do ^{238}U , bem como suas desintegrações (adaptado do IAEA, 2014).

De forma ampla e científica, são bem conhecidos os riscos para a saúde humana, causados pelas radiações ionizantes em consequência dos testes nucleares realizados na atmosfera terrestre, das explosões nucleares que ocorreram em Hiroshima e Nagasaki e dos acidentes em usinas nucleares, como em Chernobyl e Fukushima.

Outra causa de acréscimo na dose recebida pela população pode vir do simples viajar de avião, neste caso, em virtude da altitude, a dose recebida pelo indivíduo em decorrência da radiação cósmica é maior, quando comparada à dose ao nível do mar. Frequentar lugares em que o nível de radiação natural seja elevado, como por exemplo: cavernas, termas e spas, também elevará a dose recebida. A *Tabela 1* apresenta o acréscimo de dose de radiação natural recebida pelo ser humano em determinadas altitudes por razão da radiação cósmica. A *Tabela 2* mostra as estimativas de doses de radiação natural recebidas pela população mundial.

Tabela 1 – Dose de radiação natural recebida em determinadas altitudes (UNSCEAR, 2000).

Altitude (m)	Dose ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)
Nível do mar	0,03
2.000	0,10
4.000	0,20
12.000	5,00
20.000	13,00

Tabela 2 – Dose de radiação natural recebida pela população mundial (UNSCEAR, 2000).

População Mundial (%)	Dose (mSv ano^{-1})
95,0	0,3 - 0,6
3,0	1,0
1,5	1,4 - 2,4
0,5	Acima 2,4

Nota-se que grande parte da população mundial (98%) recebe doses de radiação natural abaixo de 1 mSv a^{-1} . Estes níveis variam completamente de região para região, pois trata-se de uma compilação de características intrínsecas da geologia da região. No Brasil, próximo à cidade de Poços de Caldas, estado de Minas Gerais, existe uma colina chamada “Morro do Ferro”, o lugar não é habitado e os níveis de dose de radiação natural chegam a atingir 250 mSv a^{-1} . Na cidade de Guarapari, estado do Espírito Santo, os níveis de dose de radiação natural chegam a atingir 175 mSv a^{-1} , nota-se que estes níveis são encontrados em algumas praias cujas areias são ricas em tório. Os níveis de dose de radiação natural observados em residências desta região variam de 8,0 a $15,0 \text{ mSv a}^{-1}$ (Campos, 1994)

1.1 RADÔNIO E SUAS CARACTERÍSTICAS

Os isótopos naturais conhecidos do elemento radônio são o ^{222}Rn , ^{220}Rn e o ^{219}Rn . Neste trabalho, o termo radônio trata-se exclusivamente do isótopo ^{222}Rn .

A importância do estudo deste radionuclídeo é fundamental em termos de proteção radiológica, pois o radônio contribui com de 55% para a dose recebida pelo homem, em virtude da exposição às fontes naturais de radiação (UNSCEAR, 2000).

O ^{222}Rn tem origem da desintegração radioativa do ^{226}Ra , que emite uma partícula α , dando origem ao isótopo ^{222}Rn . Trata-se de um elemento gasoso desta série radioativa primordial, sendo inerte, inodoro e insípido. Possui uma densidade sete vezes maior do que o ar, facilitando sua inalação e incorporação por meio da respiração.

O radônio é um gás nobre, caracterizado pela sua estabilidade eletrônica, por isto dificilmente irá interagir com outros elementos, possui capacidade de exalar de solos e rochas com extrema facilidade e de concentrar-se em ambientes fechados, sendo assim um dos principais contribuintes para a dose de radiação recebida pela população (Eisenbud, 1987).

Os isótopos ^{220}Rn e ^{219}Rn são produtos de decaimento das séries radioativas primordiais do ^{232}Th e ^{235}U , respectivamente. Possuem meias vidas curtas, de 52,6 segundos para o isótopo ^{220}Rn e 3,19 segundos para o isótopo ^{219}Rn . Já o isótopo ^{222}Rn possui meia vida de 3,8 dias.

Os danos causados pela inalação do ^{222}Rn , na verdade, devem-se aos seus produtos de decaimento, são eles: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e o ^{214}Po . Estes radionuclídeos são carregados eletricamente e, assim, tendem a unir-se a partículas de poeira normalmente presentes na atmosfera. Quando os produtos de decaimento do ^{222}Rn coexistem com o próprio elemento pai por um tempo suficientemente longo, acima de duas horas, estes elementos atingem o equilíbrio radiativo. Estando em equilíbrio, os produtos de decaimento passam a decair seguindo a meia vida do elemento ^{222}Rn . Neste processo, a dissipação de energia total nos pulmões advinda dos produtos de decaimento do ^{222}Rn é aproximadamente 500 vezes maior do que a energia dissipada pelo próprio ^{222}Rn (Eisenbud et al., 1997).

A *Tabela 3* apresenta as meias-vidas, tipos de desintegrações e energias correspondentes ao radônio e a seus produtos de decaimento.

Tabela 3 – Características radioativas do ^{222}Rn e de seus produtos de decaimento.

Radionuclídeo	Meia-vida	Desintegração	E (MeV)
^{222}Rn	3,8 dias	α	5,49
Produtos de Decaimento			
Meias-vidas curtas			
^{218}Po	3,0 minutos	α	6,00
^{214}Pb	26,8 minutos	β	***
^{214}Bi	19,7 minutos	β	***
^{214}Po	164,0 μ segundos	α	7,68
Meias-vidas longas			
^{210}Pb	22,3 anos	β	***
^{210}Bi	5,0 dias	β	***
^{210}Po	138,4 dias	α	5,30

1.2 EFEITOS DO RADÔNIO EM AMBIENTES FECHADOS

Na maioria dos países, principalmente nos de clima frio, o radônio é a maior fonte natural de exposição à radiação. Na população em geral, a maior exposição ocorre em ambientes internos, como em residências, escritórios, ambientes subterrâneos e galpões. No Brasil, podemos destacar o aumento da construção de prédios com fachada contínua (Caccuri, 2007).

Em ambientes externos, o radônio e seus produtos de decaimento apresentam baixos níveis de concentração devido a sua contínua dispersão na atmosfera. Entretanto, em ambientes fechados, onde há presença de traços de radionuclídeos naturais e onde normalmente as taxas de ventilação e renovação do ar são reduzidas, sua concentração poderá atingir níveis preocupantes (UNSCEAR, 2000).

A concentração de radionuclídeos naturais em materiais de construção vem sendo extensivamente estudada, pois uma vez que os materiais de construção são derivados de rochas e solos, apresentam concentrações dos radionuclídeos das séries radioativas do ^{238}U e do ^{232}Th e conseqüentemente haverá a presença do ^{222}Rn no ar ambiente (Campos, 1994).

Estudos com trabalhadores em minas subterrâneas expostos ocupacionalmente ao radônio, em altas concentrações, têm consistentemente demonstrado um aumento no risco de câncer de pulmão. Baseado principalmente nesses estudos científicos, o radônio foi classificado como um agente cancerígeno humano pela *Agência Internacional de Pesquisa em Câncer* em 1988 (IARC, 1988).

A Comissão sobre os *Efeitos Biológicos das Radiações Ionizantes* (BEIR) fez uma revisão dos principais estudos com trabalhadores ocupacionalmente expostos ao radônio *indoor* na década de 1990, nesta revisão foram considerados onze estudos de coorte, compilando 60.000 mil mineiros na Europa, América do Norte, Ásia e Austrália, mostrando que ocorreram 2.600 mortes relacionadas ao câncer de pulmão (BEIR VI, 1999). A significância do risco de câncer de pulmão observada nos estudos com trabalhadores de minas subterrâneas expostos ao radônio indica que o radônio pode ser uma causa de câncer de pulmão na população em geral, devido à exposição no interior de residências e construções, mesmo levando-se em consideração que as condições de exposição são diferentes, pois os mineiros não

foram expostos somente ao radônio, mas também ao arsênio, altamente cancerígeno (NRC, 1991).

A inalação do ^{222}Rn é considerada a segunda causa de câncer de pulmão, atrás apenas do tabagismo. Estudos mostram que em muitos países nos quais a radiatividade natural é elevada, como a França que possui uma concentração média de radônio do ar em ambientes fechados de 89 Bq m^{-3} (Catelinois et al. 2006), o radônio terá maior propensão de causar câncer de pulmão em fumantes ou em ex-fumantes do que em pessoas que nunca fumaram. Para pessoas que nunca fumaram o radônio ainda é considerado a principal causa de câncer no pulmão (WHO, 2009).

Na *Tabela 4* são apresentados os estudos que avaliaram a exposição ao radônio em residências, mostrando o aumento percentual no risco de câncer de pulmão para cada 100 Bq m^{-3} de acréscimo na concentração de radônio.

Tabela 4 – Aumento percentual do risco de câncer de pulmão para cada 100 Bq m^{-3} de acréscimo na concentração de radônio (WHO, 2009).

<i>Regiões de estudo</i>	<i>Nº de casos de câncer de pulmão em 35 anos de exposição</i>	<i>Aumento percentual no risco de câncer de pulmão</i>
<i>Europeu (Darby et al. 2005, 2006)</i>	7148	8
<i>Norte Americano (Krewski et al. 2005, 2006)</i>	3662	11
<i>Chinês (Lubin et al. 2004)</i>	1050	13

2. JUSTIFICATIVA

Quando um indivíduo passa muito tempo em uma atmosfera que contém o isótopo ^{222}Rn e seus produtos de decaimento, o tecido pulmonar é a estrutura que recebe a maior dose de radiação, todavia, outros órgãos, como os rins e a medula óssea também podem receber doses, porém menores (Kendall et al. 2002).

Os danos que o isótopo ^{222}Rn e seus produtos de decaimento podem causar aos tecidos biológicos corroboram a importância da determinação da concentração desse radionuclídeo no ar, especialmente em ambientes onde o nível de radiatividade natural seja elevado. Outros fatores a serem considerados são: o radônio sempre estará presente em locais onde houver traços de ^{238}U , que corresponde a 99,27% de todo urânio natural encontrado na crosta terrestre, sua meia vida de 3,8 dias permite que ele permaneça por tempo suficiente em um ambiente para ser inalado, especialmente se a ventilação for baixa e por ser um gás nobre e exalar com facilidade do solo, rochas e materiais de construção.

Sabe-se que os níveis de ^{222}Rn nos ambientes podem ser influenciados por diversos fatores como a temperatura, umidade do ar, composição do solo e principalmente pela ventilação do ambiente (Costa, 2011), por isso grandes concentrações de radônio podem ser encontradas em minas de prospecção de urânio, lugares geologicamente ricos em radionuclídeos naturais, como balneários e fontes de águas termais e residências que permanecem por muito tempo fechadas ou que foram construídas com matérias de construção que possuam traços de ^{226}Ra , como o fosfogesso, por exemplo (Villaverde, 2008).

Alguns estudos sobre a presença de radionuclídeos naturais em balneários têm mostrado níveis elevados da concentração de radônio no ar (Quindós Poncela et al., 2004, Radolić et al., 2005, Campos et al., 2010, Oner et al., 2013). O Brasil possui vários balneários e alguns deles são considerados relevantes em termos de proteção radiológica, em virtude da radioatividade natural de suas águas. Assim, é de grande importância avaliar a exposição dos indivíduos que trabalham nestes locais e também dos que frequentam para tratamento ou lazer.

O uso de recursos hidrotermais para prevenção e tratamento da saúde é amplamente difundido nos países europeus, onde contribui com mais de 1 milhão de empregos diretos e indiretos atraindo anualmente mais de 5 milhões de pessoas (Bouvier, 2014), e em diversas outras regiões. Estes tratamentos são baseados em

ingestão da água, banhos e imersões em águas minerais termais e na inalação dos gases presentes na água. O tratamento termal provoca um conjunto de efeitos que se obtêm devido à composição específica da água minero-medicinal coadjuvado pelos efeitos derivados do ambiente termal, da aplicação das técnicas termais e também de outras terapias. Os efeitos terapêuticos destas águas resultam, além das suas qualidades físicas, químicas e biológicas, também da via de administração e técnicas de aplicação. Apesar das várias aplicações terapêuticas e recomendações ao uso de águas termais na prevenção e/ou tratamento de diversas afeções nas mais diversas áreas, vários estudos confirmaram a capacidade das águas termais para melhorar determinadas afeções cutâneas (Harari et al., 2012; Martin et al., 2015; Klim et al., 2016).

Entre os gases inalados durante o tratamento termal encontra-se o radônio, que em proteção radiológica está geralmente associado, juntamente com seus produtos de decaimento, ao seu risco potencial ao câncer de pulmão (ICRP-32, 1981, Porstendorfer, 1993). No entanto, diversos centros termais utilizam a inalação de radônio, há décadas, como agente terapêutico, principalmente no tratamento de doenças reumáticas (Tempfer et al., 2005).

Neste trabalho será realizada a avaliação dosimétrica devido à inalação de radônio no ar para os frequentadores e trabalhadores dos balneários municipais de Águas de Lindóia e Poços de Caldas, a partir da determinação dos níveis de ^{222}Rn no ar em diversos pontos no interior dos balneários.

A cidade de Águas de Lindóia foi fundada pelo médico italiano, Francisco Tozzi, que utilizava as águas termais para o tratamento de problemas de pele, entre outros. As histórias de cura realizadas nas "Thermas de Lindoya" ganharam o Brasil, atraíram cada vez mais pessoas e propiciaram o início do engarrafamento da água mineral, em 1916. Águas de Lindóia localiza-se a 180 km de São Paulo e faz limite ao norte com Monte Sião (MG), ao sul com Lindóia (SP), ao leste com Socorro (SP) e a oeste com Itapira (SP). O clima da região é classificado como sub-tropical úmido e a precipitação média anual é de 1.400 mm. O relevo apresenta elevações variando de 700 m a 1.100 m de altitude.

A radioatividade das águas ganhou destaque após a visita de Marie Curie, que realizava pesquisas na França sobre a radioatividade. Os relatos desta visita enalteceram os valores terapêuticos das águas, tornando-as conhecidas na Europa, principalmente na França, em razão da publicação de seus trabalhos.

Inaugurado em 01 de novembro de 1959, o Balneário Municipal de Águas de Lindoia, oferece para a população o uso de piscinas, banhos terapêuticos, relaxantes e hidratantes, entre outros serviços e atendimento médico utilizando a água mineral como tratamento para lesões na pele, entre outras.

Poços de Caldas está localizada no sudeste do estado de Minas Gerais, distante 450 km da capital Belo Horizonte e 260 km da cidade de São Paulo. A cidade teve origem na descoberta de suas primeiras fontes e nascentes no século XVII e a fundação da cidade se deu em 6 de novembro de 1872. O município situa-se num planalto elíptico, com área aproximada de 750 km², altitude média de 1300 m, rodeado de montanhas com altitudes entre 1600 m e 1800 m. Há grandes reservas de minérios ferrosos, não ferrosos e radioativos. O clima de Poços de Caldas é classificado como subtropical, com inverno seco e verão brando.

O balneário municipal de Poços de Caldas, denominado Thermas Antônio Carlos foi o primeiro estabelecimento termal do Brasil, inaugurado em 1931, oferece uma série de serviços e tratamentos corporais a partir do uso da água termal. O local recebe a população local e muitos turistas em busca dos banhos em banheiras, duchas e piscina para lazer e tratamento de diversas patologias.

Medidas preliminares realizadas no balneário municipal de Águas de Lindoia mostraram que a concentração de ²²²Rn no ar é bastante elevada nos locais fechados em que se encontram as fontes de água mineral. Já em uma das salas de banho monitorada e na área aberta em que se encontra uma das fontes de água mineral do balneário, os níveis se encontram próximos ao valor recomendado pela Organização Mundial de Saúde, que é de 100 Bq/m³. Esse fato é facilmente explicado pela ventilação dos locais, que é mínima nos locais enclausurados onde se encontram as fontes de água mineral e normal nos outros ambientes.

3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a dose de radiação recebida pelos trabalhadores e indivíduos do público que frequentam o balneário municipal de Águas de Lindóia, localizado na cidade de Águas de Lindóia, estado de São Paulo e o balneário “Thermas Antônio Carlos”, cidade de Poços de Caldas, estado de Minas Gerais.

A avaliação da dose de radiação foi feita a partir da determinação da concentração do ^{222}Rn no ar realizada por meio da técnica de detecção passiva, com detectores sólidos de traços nucleares do tipo CR-39[®] inseridos em uma câmara de difusão do tipo NRPB[®].

Este trabalho pretende ainda, a partir dos resultados obtidos, sugerir o tempo médio de permanência para os trabalhadores nas áreas em que a concentração de ^{222}Rn no ar seja demasiadamente elevada e também contribuir para um banco de dados sobre a exposição à radiação, causada pela inalação de ^{222}Rn em balneários, termas e spas.

4. METODOLOGIA

4.1 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ^{222}Rn NO AR

Existem vários métodos conhecidos que são utilizados para a determinação da concentração do radônio no ar (NCRP-97, 1988). Estes métodos, são classificados como instantâneos ou contínuos, posteriormente, são divididos em duas técnicas de detecção, a ativa e a passiva. Na técnica de detecção ativa, por meio de bombeamento mecânico, uma amostra contendo vários litros de ar do ambiente é coletada, a mesma passa por um filtro, que então será analisado. Na técnica de detecção passiva, o detector é deixado no local de estudo por um período pré-determinado e posteriormente analisado (Paulo, 1991).

A Tabela 5 apresenta os tipos de detectores mais utilizados para a medida de ^{222}Rn no ar nos países que fazem parte do Programa Internacional de Radônio da Organização Mundial da Saúde.

Tabela 5 – Detectores de medição de ^{222}Rn no ar mais populares nos países estudados pelo Programa Internacional de Radônio (WHO, 2007).

Tipo de Detector	Passivo/ Ativo	Incerteza Atribuída (%)	Período de Amostragem	Custo
<i>Detectores sólidos de traços nucleares</i>	<i>Passivo</i>	<i>10 - 25</i>	<i>1 - 12 meses</i>	<i>Baixo</i>
<i>Detector de carvão ativado</i>	<i>Passivo</i>	<i>10 - 30</i>	<i>2 - 7 dias</i>	<i>Baixo</i>
<i>Câmara de ionização de eletreto</i>	<i>Passivo</i>	<i>8 - 15</i>	<i>5 - 365 dias</i>	<i>Médio</i>
<i>Detector de integração eletrônica</i>	<i>Ativo</i>	<i>~ 25</i>	<i>2 dias - anos</i>	<i>Médio</i>
<i>Monitor contínuo de radônio</i>	<i>Ativo</i>	<i>~ 10</i>	<i>1 hora - anos</i>	<i>Alto</i>

A escolha do método utilizado neste trabalho foi baseada no tipo de informação a ser perscrutada, nas características do local a ser monitorado, no tempo de amostragem e na sensibilidade dos instrumentos. Neste trabalho optou-se

pela técnica de detecção passiva, utilizando-se detectores sólidos de traços nucleares do tipo CR-39®.

4.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO PASSIVA

Na técnica de detecção passiva, os métodos mais empregados para a determinação da concentração do ^{222}Rn no ar são os detectores de carvão ativado, câmara de ionização de eletreto e os detectores sólidos de traços nucleares (WHO, 2007).

4.2.1 DETECTORES DE CARVÃO ATIVADO

Para a determinação da concentração de ^{222}Rn no ar com o uso do detector de carvão ativado, basta que o carvão permaneça por um período pré-determinado exposto ao ambiente a ser monitorado. O carvão ativado adsorve os átomos de radônio, que permaneceram no mineral por certo período de tempo. Após o equilíbrio radioativo ser atingido, a amostra de carvão é medida por um detector de germânio hiper-puro por meio da técnica de espectrometria gama para a determinação da concentração dos produtos de decaimento do ^{222}Rn (^{214}Pb e ^{214}Bi), para então inferir a concentração do ^{222}Rn na amostra de carvão ativado (Campos, 1994).

4.2.2 CÂMARA DE IONIZAÇÃO DE ELETRETO

As câmaras de ionização de eletreto são dispositivos passivos que funcionam como detectores integrados para medir a concentração média do ^{222}Rn durante o período de medição. O eletreto funciona como fonte de um campo elétrico e como um sensor na câmara de ionização. Somente o radônio ingressa na câmara por difusão passiva, filtro barra a entrada dos seus produtos de decaimento.

A radiação emitida pelo ^{222}Rn e seus produtos de decaimento formados dentro da câmara ionizam o ar contido em seu interior. Os íons negativos são

recolhidos pelo eletreto positivo. A descarga dada em volts pelo eletreto é medida e relacionada com a concentração de ^{222}Rn no ar (Kotrappa et al. 1990).

4.2.3 DETECTORES SÓLIDOS DE TRAÇOS NUCLEARES

Os detectores sólidos de traços nucleares – SSNTD (*Solid State Nuclear Track Detection*) possuem a propriedade de registrar os danos causados por partículas carregadas, quando estas colidem sob sua superfície. As partículas carregadas atravessam o detector causando ionizações no meio. Este processo primário de ionização desencadeia uma série de novos processos químicos que resultam na criação de radicais livres, assim ao longo da trajetória de uma partícula incidida é criada uma região danificada chamada de traço latente (Nikezic et al. 2004). Os traços que são produzidos por estas partículas carregadas são da ordem de 100 a 200 Å (10^{-10} m) e invisíveis a olho nu (Enge, 1980).

Após a formação do traço latente, o detector precisa passar por um tratamento químico ou eletroquímico, processo que é chamado de revelação. A solução usada neste processo tem a finalidade de corroer o detector, dissolvendo a camada superficial do material com certa velocidade de ataque. O traço latente torne-se então observável em um microscópio óptico, fornecendo informações sobre a partícula incidida (Enge, 1980).

Ao longo dos anos foram desenvolvidos alguns materiais para serem utilizados como detectores sólidos de traços nucleares, tais como os policarbonatos, comercialmente conhecidos como Lexan® e Makrofol® (*Figura 4*), os nitratos de celulose, comercialmente conhecidos como Daicel® e LR-115® (*Figura 3*) e o allyldiglicol-carbonato, comercialmente conhecido como CR-39® (*Figura 6*) (Paulo, 1991). Estudos nacionais também aplicam um policarbonato chamado de Durolon® (*Figura 5*), este detector é de fabricação nacional e apresentou resultados adequados na detecção de partículas alfa e nêutrons (Aquino et al. 2014; Pugliesi, 2008).

As Figuras 3, 4, 5 e 6, ilustram respectivamente a superfície dos detectores LR-115[®], Makrofol[®], Durolon[®] e CR-39[®] após o tratamento químico.

Figura 3 - Traços na superfície do detector LR-115[®] (Cazula, 2015).

Figura 4 - Traços na superfície do detector Makrofol[®] (Cazula, 2015).

Figura 5 - Traços na superfície do detector Durolon[®] (Cazula, 2015).

Figura 6 - Traços na superfície do detector CR-39[®] (Cazula, 2015).

Neste trabalho o detector utilizado foi o allyldiglicol-carbonato, comercialmente conhecido como CR-39[®]. Este polímero originalmente foi desenvolvido pela *Columbia Chemical Co. Inc.* em 1940 e em 1947 foi utilizado para a fabricação de lentes de óculos. Trata-se da 39^o fórmula de um plástico termorrígido, daí o nome “Columbia Resin 39” (Campos, 1999). Este detector foi escolhido por possuir uma superfície mais límpida em relação aos concorrentes mencionados e, por sua disponibilidade no Laboratório de Radiometria Ambiental.

4.3 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO AR COM DETECTORES DE TRAÇOS

A determinação da concentração de ^{222}Rn no ar com detectores de traços é feita pelo método de detecção passiva utilizando-se câmaras de difusão do tipo NRPB® (*National Radiological Protection Board*). Esta câmara tem a finalidade de impedir a penetração do isótopo ^{220}Rn e dos produtos de decaimento do ^{222}Rn , permitindo que a densidade de traços registrada na superfície do detector seja referente apenas ao ^{222}Rn . No interior de cada câmara de difusão é inserido um detector sólido de traços nucleares do tipo CR-39®, com área de 2,5 cm².

Os detectores de traços ficaram expostos ao ar ambiente por períodos que variaram entre 30 a 120 dias, dependendo no nível de concentração de ^{222}Rn naquele ambiente. Após o período de exposição, os detectores passaram por um tratamento químico e posteriormente foram analisados em um microscópio óptico para determinação da densidade de traços nas superfícies dos detectores.

O cálculo da concentração do radônio no ar é feito por meio da *Equação 1*, a partir da densidade de traços na superfície do detector exposto, do tempo de exposição e do fator de calibração que relaciona a densidade de traços na superfície do detector com a concentração de radônio no ar (Mayya et al. 1998).

$$C_{Rn} = \frac{D}{k \cdot t_{ef}} \quad \text{Equação 1}$$

onde:

$C_{Rn} \rightarrow$ Concentração de ^{222}Rn no ar (Bq m^{-3});

$D \rightarrow$ Densidade de traços, descontando-se a densidade relativa à radiação de fundo do detector (traços cm⁻²);

$k \rightarrow$ Fator de calibração (traços cm⁻² por $\text{Bq m}^{-3} \text{ d}^{-1}$);

$t_{ef} \rightarrow$ Tempo efetivo de exposição (d).

4.4 AVALIAÇÃO DE DOSE EFETIVA DEVIDO À INALAÇÃO DO ^{222}Rn

A inalação é a principal via de incorporação de radionuclídeos como o radônio, por tratar-se de um elemento gasoso e por ser classificado como nobre, o ^{222}Rn não interage com o trato respiratório. A avaliação de dose de radiação devido à inalação do ^{222}Rn é importante ser determinada, pois o detrimento causado no trato respiratório deve-se aos seus produtos de decaimentos ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po . Uma parte do que é inalado fica depositado no trato respiratório e daí é transportado para os órgãos de afinidade, o restante é exalado (ICRP-66, 1994).

A determinação da dose efetiva de radiação recebida pelos tecidos do trato respiratório devido à inalação do ^{222}Rn não pode ser medida diretamente e deve ser feita através de modelos dosimétricos que possam avaliar a quantidade de material que foi inalado e a sua deposição, retenção e eliminação pelo sistema respiratório.

A metodologia para a realização do cálculo da taxa de dose efetiva pode ser feita de duas maneiras distintas:

- Dosimetria física, a partir da medida da dose absorvida nas células do epitélio bronquial;
- Avaliação epidemiológica, a partir da avaliação do detrimento sofrido pelos mineiros de ferro, carvão e urânio.

A diferença no resultado da dose obtida adotando ambas abordagens é de um fator de 2,5 que se pode considerar satisfatório em termos de cálculo de dose, levando em consideração a complexidade das variáveis envolvidas (NORNC, 2000).

Neste trabalho, para a determinação da dose efetiva de radiação devido à inalação do radônio nos balneários estudados, utilizou-se os procedimentos prescritos pela ICRP 89 (*International Commission on Radiological Protection*), adotando-se o método de avaliação epidemiológica, por meio da *Equação 2*.

$$E = C \times I \times t \times FCD$$

Equação 2

onde:

$E \rightarrow$ dose efetiva de radiação devido á inalação do ^{222}Rn (mSv a^{-1});

$C \rightarrow$ concentração de ^{222}Rn no ar (Bq m^{-3});

$I \rightarrow$ taxa anual de respiração média do homem referência ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);

$t \rightarrow$ tempo de exposição (h a^{-1});

$FCD \rightarrow$ fator de conversão de dose para inalação do radônio (mSv Bq^{-1}).

Foram considerados três cenários de exposição para a avaliação de dose nos dois balneários. O primeiro cenário corresponde à exposição dos trabalhadores que aplicam os banhos termais nos usuários, o segundo cenário corresponde à exposição dos trabalhadores que realizam manutenções nas fontes termais e o terceiro cenário abrange os frequentadores assíduos dos banhos termais. A *Tabela 6* apresenta os valores empregados na equação 2 para o cálculo da dose efetiva.

Tabela 6 – Valores empregados na equação para o cálculo da dose efetiva de radiação devido à inalação do ^{222}Rn .

Grandezas	Valor empregado	Referência
	<i>Concentração de ^{222}Rn no ar obtida</i>	
C	<i>experimentalmente em cada ponto de amostragem</i>	<i>Experimental</i>
I	$1,2 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$	<i>ICRP 89</i>
	1590 h a^{-1}	<i>Trab. nas Salas de Banho</i>
t	400 h a^{-1}	<i>Trab. Da Manutenção das Fontes</i>
	99 h a^{-1}	<i>Usuários do Banho</i>
FCD	$0,0000025$	<i>ICRP 89</i>

4.5 NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO AR

É recomendável definir ou seguir um nível de referência, nacional ou internacional, o mais baixo quanto razoavelmente possível, pois o risco de câncer de pulmão aumenta com a exposição a longo prazo em altas concentrações de ^{222}Rn no ar (UNSCEAR, 2008).

Neste trabalho adotou-se os níveis de referência internacionais, definidos pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2009), pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA US, 1993) e pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 2009) para comparação com os resultados de concentração de ^{222}Rn obtidos nos balneários de Águas de Lindoia e Poços de Caldas.

A *Tabela 7* apresenta os níveis utilizados nos balneários, como referência para a concentração de ^{222}Rn no ar.

Tabela 7 – Níveis de concentração de ^{222}Rn no ar utilizados como referência neste trabalho.

Entidade Regulatória	Tipo de Exposição	Níveis de Referência
WHO (2009)	Indivíduo do público	100 Bq m ⁻³
EPA US (1993)	Indivíduo do público	148 Bq m ⁻³
ICRP (Declaração, 2009)	Indivíduo do público	300 Bq m ⁻³
	IOE	1000 Bq m ⁻³

5. PARTE EXPERIMENTAL

5.1 ÁREAS DE ESTUDO

A dosimetria do ^{222}Rn no ar foi realizada no balneário municipal de Águas de Lindóia e no balneário Thermas Antônio Carlos, na cidade de Poços de Caldas.

Estes balneários foram estudados por fornecerem dados relevantes para a monitoração de radônio no ar, em ambientes cujo a radiação seja de origem natural. A cidade de Águas de Lindóia é reconhecida por ser uma estância hidromineral, seus balneários e suas fontes termais são conhecidas por fornecerem tratamentos complementares, utilizando-se das águas. Além da cidade de Águas de Lindóia, o Brasil possui outras estâncias, como Caxambú-MG, Caldas Novas-GO, Caldas da Imperatriz-SC.

O balneário municipal de Águas de Lindóia foi construído no século 19, mas a sua fama ultrapassou as fronteiras brasileiras quando em 1928, a renomada cientista francesa, Madame Curie, esteve em visita no Brasil. Curie visitou o balneário e então, enalteceram os valores terapêuticos das águas, principalmente na Europa, onde a cientista teve inúmeros trabalhos publicados. Nos dias atuais, o balneário ainda é procurado por pessoas que sofrem com problemas renais, eczemas, artrites e problemas circulatórios.

Dentro do balneário, três fontes se destacam: fonte São Roque, fonte Filomena e fonte Curie. Estas fontes possuem águas hipotermais, oligominerais, oxigenogassos e fracamente radioativas na fonte, que possuem incontestável ação medicamentosa.

A cidade de Poços de Caldas, assim como Águas de Lindóia, também é intitulada como estância hidromineral. Há relatos que as águas termais de Poços de Caldas já eram utilizadas desde o século 18 no tratamento da lepra (Lemos, 1904). Somente no século 19, as propriedades curativas das águas foram associadas aos elementos presentes na mesma.

O balneário “Thermas” Antônio Carlos, inaugurado em 1931, passou a ser fonte importante para tratamentos complementares de doenças, para pessoas que

buscavam o poder curativo de suas águas. Até os dias de hoje, o balneário é procurado para diversos tipos banhos.

5.2 POSTOS DE AMOSTRAGEM

5.2.1 BALNEÁRIO MUNICIPAL DE ÁGUAS DE LINDÓIA

Os pontos de amostragem foram escolhidos a partir de medidas preliminares realizadas no balneário, foram escolhidos os locais em que a concentração de radônio no ar era significativamente elevada, considerando a exposição dos trabalhadores e também os locais frequentados pelos indivíduos do público para tratamento e/ou recreação. No total foram 6 pontos de amostragem analisados no balneário municipal de Águas de Lindóia. As *Figuras 7, 8, 9, 10 e 11* mostram os detectores expostos ao ar ambiente, em cada ponto amostrado.

A *Figura 7* ilustra a “*fonte Filomena*”.

(a)

(b)

(c)

Figura 7 – (a) Detectores expostos dentro da “fonte Filomena”. (b) Vista do alcôapão da “fonte Filomena”. (c) Vista superior da entrada da “fonte Filomena” (Acervo pessoal, 2017).

A Figura 8 ilustra a “fonte Curie”.

(a)

(b)

A

Figura 8 – (a) Detectores expostos dentro da “fonte Curie”. (b) Vista superior da entrada da “fonte Curie” (Acervo pessoal, 2017).

Figura 9 ilustra a “fonte São Roque”.

(a)

(b)

Figura 9 – (a) Vista do alçapão da “fonte São Roque”. (b) Detectores expostos dentro da “fonte São Roque” (Acervo pessoal, 2017).

A Figura 10 ilustra as salas de banho, masculino e feminino.

(a)

(b)

Figura 10 – (a) Detectores expostos dentro da sala de banho masculino. (b) Detectores expostos dentro da sala de banho feminino (Acervo pessoal, 2017).

A Figura 11 ilustra o emanatório São Roque.

(a)

(b)

Figura 11 – (a) Vista interior do emanatório “São Roque”. (b) Detectores expostos no emanatório “São Roque” (Acervo pessoal, 2017).

5.2.2 BALNEÁRIO THERMAS ANTÔNIO CARLOS

Seguindo o mesmo critério de avaliação utilizado no balneário municipal de Águas de Lindóia, foram escolhidos 4 pontos de amostragem no balneário Thermas Antônio Carlos. As *Figuras 12 e 13* apresentam os pontos de amostragem com os respectivos detectores.

A *Figura 12* ilustra as “3 fontes”.

(a)

(b)

Figura 12 – (a) Primeira conjunto de detectores expostos dentro das “3 fontes”. (c) Segunda duplicata de detectores expostos dentro das “3 fontes” (Acervo pessoal, 2017).

A *Figura 13* ilustra as salas de banho, masculina e feminina.

Figura 13 – Detectores expostos nas salas de banho (Acervo pessoal, 2017).

5.3 MONTAGEM DAS CÂMARAS DE DIFUSÃO

Para obter-se a concentração do radônio no ar nos ambientes estudados, foram utilizados detectores sólidos de traços nucleares do tipo CR-39® inseridos em câmaras de difusão do tipo NRPB®. A *Figura 14* ilustra uma câmara aberta com o detector inserido.

Figura 14 – (a) Vista lateral da câmara de difusão do tipo NRPB®. (b) Câmara de difusão NRPB® aberta com um SSNTD do tipo CR-39® inserido (Acervo pessoal, 2017).

Em cada ponto de amostragem, foi posicionado um arranjo com 2 câmaras de difusão contendo um detector de traço em cada uma delas, conforme ilustra a *Figura 15*. A concentração do radônio no ar obtida em cada ponto de amostragem é dada pela média aritmética da concentração em cada detector de traços e a sua incerteza é expressa como o desvio padrão entre os pontos.

Figura 15 – Arranjo inserido nos pontos de amostragem (Cazula, 2015).

5.4 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO AR

Após a montagem das câmaras de difusão os detectores foram expostos ao ar ambientes nos dois locais de estudo.

Os detectores ficaram expostos ao ar ambiente no balneário municipal de Águas de Lindóia por períodos que variaram de 36 a 139 dias, conforme a taxa de ventilação no ponto de amostragem. As fontes de água mineral que se encontram em local fechado e que são acessadas apenas pelos funcionários do balneário (Filomena, Curie e São Roque) foram denominados ambientes pouco ventilados, já as salas de banho feminino e masculino e o emanatório São Roque localizadas em ambientes com maior ventilação foram denominados ambientes ventilados. Foram realizadas quatro campanhas de amostragem para determinação da concentração de ^{222}Rn no ar, a *Tabela 8* apresenta os períodos de exposição para os dois tipos de ambiente em cada campanha de amostragem.

Tabela 8 – Tempo de exposição dos detectores em função do tipo de ambiente no balneário municipal de Águas de Lindóia.

<i>Campanha</i>	<i>Período do Ano</i>	<i>Tempo de exposição (d)</i>	
		<i>Ambiente pouco ventilado</i>	<i>Ambiente ventilado</i>
1º	Abril - Julho (2016)	73	73
2º	Fevereiro - Julho (2017)	36	139
3º	Julho - Outubro (2017)	51	106
4º	Outubro - Dezembro (2017)	49	49

Os detectores ficaram expostos no ar ambiente do balneário “Thermas Antônio Carlos” por períodos que variam entre 103 e 148 dias em três campanhas de amostragem. Diferente do que ocorreu no balneário municipal de Águas de Lindóia, foi adotado o mesmo tempo de exposição para os dois tipos de ambiente (fonte de água e salas de banho), pois não havia grande diferença na taxa de ventilação. Na *Tabela 9* são apresentados os tempos de exposição em cada campanha de amostragem.

Tabela 9 – Tempo de exposição dos detectores expostos no ar do balneário “Thermas Antônio Carlos”.

<i>Campanha</i>	<i>Período do Ano</i>	<i>Tempo de Amostragem (d)</i>
1º	Março - Julho (2017)	103
2º	Julho - Outubro (2017)	106
3º	Outubro - Março (2018)	148

Após o término de cada campanha de amostragem, em ambos os balneários, os detectores eram trocados, os que tinham sido expostos ao ar ambiente foram recolhidos e encaminhados ao Laboratório de Radiometria Ambiental para análise e os novos detectores foram expostos ao ar ambiente, substituindo os que haviam sido retirados.

Os detectores expostos foram submetidos a um ataque químico, processo chamado de revelação. Alguns autores utilizam técnicas de revelação ou protocolos diferentes, pois o método de revelação está intrinsecamente ligado ao tipo do material do detector. Neste trabalho utilizou-se uma solução de 30% de hidróxido de potássio e 70% de água hiper-pura, os detectores ficaram imersos nesta solução por 5,5 horas em banho-maria, a uma temperatura controlada de 80° C (Neman, 2000).

O sistema de revelação utilizado foi um banho-maria Quimis® modelo Q215s, com incerteza de $\pm 1,5^\circ$ C. Os detectores foram revelados individualmente em recipientes de vidro e monitorados durante o processo, a fim de evitar qualquer acidente por conta da agitação constante.

A solução química utilizada no processo de revelação tem a finalidade de corroer o detector, dissolvendo a camada superficial do material com certa velocidade de ataque. O traço latente torna-se observável em um microscópio óptico (Enge, 1980).

Os detectores foram então analisados em um microscópio óptico com objetiva de 10x, para assim obter-se a densidade de traços (traços cm^{-2}). A densidade de traços pode ser obtida analisando a superfície total do detector ou analisando faixas da superfície do detector. Neste trabalho optou-se por analisar faixas do detector, uma vez que os traços se distribuem de forma homogênea (Alberigi et al. 2005).

A concentração de ^{222}Rn no ar foi calculada a partir da densidade de traços, do tempo de exposição e do fator de calibração, por meio da *Equação 1*.

Considerando que a densidade de traços referente à radiação de fundo dos detectores do tipo CR-39[®] varia de lote para lote, a mesma foi determinada em todos os lotes expostos (IAEA, 2013).

Neste trabalho utilizou-se o fator de calibração (k) específico para os detectores sólidos de traços nucleares do tipo CR-39[®], conforme mostra a *Tabela 10* (Mayya et al. 1998).

Tabela 10 – Fator de calibração (k) utilizado para a determinação da concentração de ^{222}Rn no ar (Mayya et al. 1998).

<i>Tipo de Detector SSNTD</i>	<i>K (traços cm^{-2} por $\text{Bq m}^{-3} \text{ d}^{-1}$)</i>
<i>CR-39[®]</i>	<i>$0,0672 \pm 0,0048$</i>

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CONCENTRAÇÕES DE ^{222}Rn NO AR NO BALNEÁRIO MUNICIPAL DE ÁGUAS DE LINDÓIA

A concentração de ^{222}Rn no ar e respectivo desvio padrão em cada ponto de amostragem no balneário municipal de Águas de Lindóia é apresentada na *Tabela 11*.

Tabela 11 – Concentrações de ^{222}Rn no ar no balneário municipal de Águas de Lindóia.

Concentrações de ^{222}Rn no ar (Bq m^{-3})				
Pontos de Amostragem	1º Campanha (abr-jul/2016)	2º Campanha (fev-jun/2017)	3º Campanha (jul-out/2017)	4º Campanha (out-dez/2017)
Banho Feminino	35 ± 5	26 ± 1	78 ± 16	49 ± 7
Banho Masculino	38 ± 5	27 ± 1	58 ± 4	71 ± 5
Emanatório São Roque	27 ± 4	21 ± 1	56 ± 6	51 ± 8
Fonte Filomena	605 ± 45	11966 ± 298	8992 ± 936	8814 ± 918
Fonte Curie	449 ± 27	11371 ± 207	13192 ± 1300	12142 ± 257
Fonte São Roque	407 ± 36	16451 ± 298	8456 ± 446	14745 ± 2125

A *Figura 16* mostra graficamente todas as campanhas de amostragem realizadas nas salas de banho, masculino e feminino, e no emanatório São Roque. Juntamente com as concentrações encontradas experimentalmente, estão os níveis internacionais de referência utilizados neste trabalho.

Figura 16 – Níveis de concentrações de ²²²Rn no ar encontrados nas salas de banho, masculino e feminino, e no emanatório São Roque.

A Figura 17 mostra graficamente todas as campanhas de amostragem realizadas nas fontes Filomena, Curie e São Roque. Juntamente com as concentrações encontradas experimentalmente estão os níveis internacionais de referência utilizados neste trabalho.

Figura 17 – Níveis de concentrações de ²²²Rn no ar encontrados nas fontes Filomena, Curie e São Roque.

Os resultados obtidos nas salas de banho feminino e masculino e no emanatório São Roque, onde há constante presença de trabalhadores do balneário e frequentadores utilizando as salas de banho para tratamento ou recreação e relaxamento estão abaixo de 100 Bq m^{-3} , nível de referência mais conservativo adotado pela Organização Mundial da Saúde. Por outro lado, os valores de concentração de ^{222}Rn no ar encontrados nos ambientes em que as fontes termais estão localizadas variaram de $407 \pm 36 \text{ Bq m}^{-3}$ a $16541 \pm 298 \text{ Bq m}^{-3}$, estes valores estão muito acima dos recomendados pelos órgãos internacionais. Contudo, já eram esperados, pois tratam-se de fontes termais localizadas em ambientes confinados, com baixa ventilação, o que contribui para o aumento da concentração de ^{222}Rn no ar ambiente.

Nota-se também que as concentrações de ^{222}Rn no ar encontradas nas fontes Filomena, Curie e São Roque, na 1ª campanha de amostragem, são 24 vezes menores do que as concentrações encontradas no restante das campanhas, para as mesmas fontes. De acordo com as informações fornecidas pela administração do balneário, houve manutenção no sistema elétrico de bombeamento da água nas três fontes e os locais permaneceram abertos durante o período de expediente, por vários dias na 1ª campanha, o que acarretou em maior circulação de ar no local e aumento da taxa de ventilação. Uma vez que a concentração de ^{222}Rn no ar em um ambiente é dependente da taxa de ventilação, a maior circulação do ar explica a redução na concentração de radônio em comparação com as outras três campanhas subsequentes de amostragem.

6.2 CONCENTRAÇÕES DE ^{222}Rn NO AR NO BALNEÁRIO THERMAS ANTÔNIO CARLOS

As concentrações de ^{222}Rn no ar encontradas no balneário Thermas Antônio Carlos são apresentadas na *Tabela 12*, juntamente com seus respectivos desvios padrão. Foram realizadas três campanhas de amostragem no balneário.

Tabela 12 – Níveis de concentrações de ^{222}Rn no ar encontrados no balneário Thermas Antônio Carlos.

Concentrações de ^{222}Rn no ar (Bq m^{-3})			
Pontos de Amostragem	1ª Campanha (mar-jul/2017)	2ª Campanha (jul-out/2017)	3ª Campanha (out-mar/2018)
Banho Feminino	55 ± 3	53 ± 4	35 ± 3
Banho Masculino	70 ± 4	**	35 ± 3
3 Fontes (ponto 1)	145 ± 5	156 ± 4	119 ± 7
3 fontes (ponto 2)	77 ± 6	71 ± 1	51 ± 1

**Detector extraviado

A Figura 18 mostra graficamente as concentrações de ^{222}Rn no ar nos ambientes monitorados, em todas as campanhas de amostragem realizadas no balneário Thermas Antônio Carlos. São também apresentados os níveis internacionais de referência utilizados neste trabalho para comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Figura 18 – Níveis de concentrações de ^{222}Rn no ar encontrados no balneário Thermas Antônio Carlos, em todos os ambientes estudados.

Observa-se que os níveis de concentração de ^{222}Rn no ar encontrados nas salas de banho do balneário Thermas Antônio Carlos, em todas as campanhas, são inferiores ao nível de referência mais conservativo de 100 Bq m^{-3} (WHO, 2007). Em relação aos níveis encontrados na sala das fontes, estes encontram-se entre o nível de referência mais conservativo de 100 Bq m^{-3} e o nível de referência de 300 Bq m^{-3} , recomendado pela publicação 103 da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP-103, 2008).

Esperava-se que na sala das fontes, a concentração de ^{222}Rn no ar fosse elevada, em virtude da radiatividade natural das águas e pela menor ventilação do que em um ambiente aberto, entretanto os resultados obtidos não podem ser considerados elevados, especialmente quando comparados com as concentrações obtidas no balneário municipal de Águas de Lindoia. Tal fato pode ser explicado pelas características estruturais do ambiente, no caso do balneário municipal de Águas de Lindoia, as fontes se encontram em um ambiente fechado e de pequena dimensão. Já no balneário Thermas Antônio Carlos, a sala das fontes dá acesso somente ao maquinário que faz o bombeamento mecânico das águas termais, as fontes termais propriamente estão no subsolo e não há como ter acesso as mesmas.

Os resultados obtidos nas salas de banho monitoradas no balneário Thermas Antônio Carlos são semelhantes aos encontrados no balneário municipal de Águas de Lindoia.

Os resultados obtidos neste trabalho são compatíveis com os valores de concentração de ^{222}Rn no ar encontrados em outros balneários pelo mundo, conforme apresentado na *Tabela 13*.

Tabela 13 – Valores de concentrações de ^{222}Rn no ar encontrados em diversos balneários pelo mundo.

Balneários	Intervalo de Concentrações (Bq m^{-3})
<i>Slovenia (Vaupoti et al., 2001)</i>	> 200
<i>Serbia spa (Manic et al., 2006)</i>	480 – 13400
<i>Termas de Araxá spa (Campos et al., 2010).</i>	258 – 1634
<i>Croácia (Radolica et al., 2015)</i>	40 – 4500

<i>Portuguese spa (Silva et al., 2016)</i>	73 – 3479
<i>Portuguese spa (Silva et al., 2018)</i>	68 – 4051
<i>Balneário Municipal de Águas de Lindóia</i> <i>(presente trabalho)</i>	21 – 16451
<i>Balneário Thermas Antônio Carlos</i> <i>(presente trabalho)</i>	35 - 156

6.3 DOSE EFETIVA DE RADIAÇÃO DEVIDO A INALAÇÃO DO ^{222}Rn NO BALNEÁRIO MUNICIPAL DE ÁGUAS DE LINDÓIA

Neste trabalho, para a avaliação da dose efetiva de radiação recebida pelo público em ambos balneários, adotou-se os limites estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica. A estimativa da dose de radiação recebida é baseada no homem referência, cujas características fisiológicas e anatômicas estão definidas na publicação 23 (ICRP-23, 1975).

A fim de realizar a avaliação dosimétrica da forma mais realista possível, conforme descrito anteriormente, foram definidos três cenários distintos para o cálculo de dose efetiva. A distinção ocorre no tempo de exposição (h a^{-1}) de cada funcionário do balneário ou usuário no local estudado. A *Tabela 14* apresenta a descrição dos cenários avaliados.

Tabela 14 – Cenários utilizados para o cálculo da dose efetiva causada pela inalação do ^{222}Rn no ar de ambos balneários.

Cenário	$t (\text{h a}^{-1})$	Justificativa
1º Cenário - Trabalhador Comum* (banho)	1590	Jornada de trabalho de 5,5h por dia x 6 dias x 50 semanas ao ano
2º Cenário - Trabalhador Comum* (manutenção)	200	Jornada de trabalho de 8h por quinzena x 25 quinzenas ao ano
3º Cenário - Frequentedor Assíduo dos Banhos Termais	99	Usuário do banho por 0,33h por dia x 6 dias x 50 semanas ao ano

**Neste trabalho é considerado trabalhador comum os funcionários do balneário, sendo excluída a classificação de IOE (Indivíduo Ocupacionalmente Exposto) para os mesmo.*

As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam os resultados da dose efetiva recebida pela inalação do ^{222}Rn no ar ambiente do balneário municipal de Águas de Lindóia, considerando o 1º, 2º e 3º cenário, respectivamente.

Tabela 15 – Doses de radiação recebidas no balneário considerando o 1º cenário.

1º Cenário				
Doses Efetivas de Radiação E (mSv a⁻¹)				
Pontos de Amostragem	1º Campanha	2º Campanha	3º Campanha	4º Campanha
Banho Feminino	0,17	0,12	0,37	0,24
Banho Masculino	0,18	0,13	0,28	0,34
Emanatório São Roque	0,13	0,10	0,27	0,24

Tabela 16 – Doses de radiação recebidas no balneário considerando o 2º cenário.

2º Cenário				
Doses Efetivas de Radiação E (mSv a⁻¹)				
Pontos de Amostragem	1º Campanha	2º Campanha	3º Campanha	4º Campanha
Fonte Filomena	0,36	7,2	5,4	5,3
Fonte Curie	0,27	6,8	7,9	7,3
Fonte São Roque	0,24	9,9	5,1	8,9

Tabela 17 – Doses de radiação recebidas no balneário considerando o 3º cenário.

3º Cenário				
Doses Efetivas de Radiação E (mSv a⁻¹)				
Pontos de Amostragem	1º Campanha	2º Campanha	3º Campanha	4º Campanha
Banho Feminino	0,01	0,01	0,02	0,01
Banho Masculino	0,01	0,01	0,02	0,02
Emanatório São Roque	0,01	0,01	0,02	0,02

As Figuras 19, 20 e 21 mostram, graficamente, as doses recebidas no balneário municipal de Águas de Lindóia, considerando o 1º, 2º e 3º cenários, respectivamente. São também apresentados o limite de dose anual de 1 mSv a⁻¹ para indivíduos do público, adotado pela *Comissão Nacional de Energia Nuclear* (CNEN NN 3.01) e o valor de 2,4 mSv a⁻¹, sugerido pelo *Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica* (UNSCEAR, 2000), para fontes naturais de radiação.

Figura 19 – Doses recebidas no balneário municipal de Águas de Lindóia, considerando o 1º cenário.

Figura 20 – Doses recebidas no balneário municipal de Águas de Lindóia, considerando o 2º cenário.

Figura 21 – Doses recebidas no balneário municipal de Águas de Lindóia, considerando o 3º cenário.

Nota-se que para todos os cenários avaliados, o 2º é o que mais chama atenção pelas doses elevadas. No 1º e 3º cenários os resultados obtidos estão abaixo do limite de dose anual para indivíduos do público adotado pela Comissão

Nacional de Energia Nuclear e do valor médio mundial sugerido pelo UNSCEAR para fontes naturais de radiação.

6.4 DOSE EFETIVA DE RADIAÇÃO DEVIDO A INALAÇÃO DO ^{222}Rn NO BALNEÁRIO THERMAS ANTÔNIO CARLOS

A fim de obter-se resultados realistas, os mesmos cenários descritos na *Tabela 14* foram adotados para o cálculo da dose efetiva devido à inalação no balneário Thermas Antônio Carlos, pois os dois balneários seguem a mesma metodologia para os banhos termais e horários de atendimento.

As *Tabelas 18, 19 e 20* apresentam as doses efetivas recebidas pela inalação do ^{222}Rn no ar ambiente do balneário Thermas Antônio Carlos, considerando o 1º, 2º e 3º cenário, respectivamente.

Tabela 18 – Doses efetivas devido à inalação de ^{222}Rn no balneário Thermas Antônio Carlos considerando o 1º cenário.

1º Cenário			
Doses Efetiva E (mSv a⁻¹)			
Pontos de Amostragem	1º Campanha	2º Campanha	3º Campanha
Banho Feminino	0,26	0,25	0,17
Banho Masculino	0,33	**	0,17

Tabela 19 – Doses efetivas devido à inalação de ^{222}Rn no balneário Thermas Antônio Carlos considerando o 2º cenário.

2º Cenário			
Doses Efetivas de Radiação E (mSv a⁻¹)			
Pontos de Amostragem	1º Campanha	2º Campanha	3º Campanha
3 fontes (ponto 1)	0,09	0,09	0,07
3 fontes (ponto 2)	0,05	0,04	0,03

Tabela 20 – Doses efetivas devido à inalação de ^{222}Rn no balneário Thermas Antônio Carlos considerando o 3º cenário.

3º Cenário			
Doses Efetivas de Radiação E (mSv a⁻¹)			
Pontos de Amostragem	1º Campanha	2º Campanha	3º Campanha
Banho Feminino	0,02	0,02	0,01
Banho Masculino	0,02	**	0,01

**Detector extraviado

As Figuras 22, 23 e 24 mostram, graficamente, as doses recebidas no balneário Thermas Antônio Carlos, considerando o 1º, 2º e 3º cenários, respectivamente. São também apresentados o limite de dose anual de 1 mSv a⁻¹ para indivíduos do público, adotado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN NN 3.01) e o valor de 2,4 mSv a⁻¹, sugerido pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR, 2000), para fontes naturais de radiação.

Figura 22 – Doses recebidas no balneário Thermas Antônio Carlos, considerando o 1º cenário.

Figura 23 – Doses recebidas no balneário Thermas Antônio Carlos, considerando o 2º cenário.

A Figura 24 mostra graficamente as doses recebidas no balneário, considerando o 3º cenário.

Figura 24 – Doses recebidas no balneário Thermas Antônio Carlos, considerando o 3º cenário.

Diferente do que ocorreu no balneário municipal de Águas de Lindoia, no balneário Thermas Antônio Carlos não foram observadas doses elevadas de

radiação para o cenário que envolve a exposição dos trabalhadores, o que obviamente era esperado, uma vez que as concentrações de ^{222}Rn no ar no balneário não são elevadas.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho as concentrações do isótopo ^{222}Rn no ar nos balneários das cidades de Águas de Lindoia e Poços de Caldas foram determinadas com o uso detectores de traços nucleares, os resultados apresentaram boa reprodutibilidade, demonstrando que a técnica foi aplicada de maneira satisfatória. Foram adotados três cenários de exposição realistas para a avaliação da dose efetiva devido à inalação de radônio para trabalhadores dos balneários e indivíduos do público que frequentam o local para tratamento ou recreação.

No balneário municipal de Águas de Lindoia foram identificados dois tipos de ambiente em relação à taxa de ventilação, as salas de banho e o emanatório São Roque (ventilação normal) e os ambientes das fontes (baixa ventilação). Nos locais ventilados as concentrações de ^{222}Rn no ar variam de $26 \pm 1 \text{ Bq m}^{-3}$ a $78 \pm 16 \text{ Bq m}^{-3}$, já nos locais pouco ventilados os resultados variaram de $407 \pm 36 \text{ Bq m}^{-3}$ a $16451 \pm 298 \text{ Bq m}^{-3}$. Não foi observada correlação entre as concentrações obtidas e a variação sazonal. A grande variação nos resultados encontrados nos ambientes das fontes termais é devida à maior ventilação nos locais durante a primeira campanha de amostragem, ocorrida em virtude da manutenção das fontes.

Sabe-se que em ambientes fechados, onde haja a presença de traços de radionuclídeos naturais e onde normalmente as taxas de ventilação e renovação do ar sejam reduzidas, as concentrações de ^{222}Rn no ar podem atingir níveis significativos (UNSCEAR, 2000). Sugere-se que para a diminuição da concentração de ^{222}Rn no ar e, conseqüentemente da dose recebida, considerando o 2º cenário, o trabalhador responsável pela manutenção das fontes Filomena, Curie e São Roque abra as portas e alçapões que dão acesso as fontes, deixando-as abertas por pelo menos 1h, antes de iniciar as atividades de trabalho no local.

No balneário Thermas Antônio Carlos não foi observada diferença significativa na taxa de ventilação entre as salas de banho e a sala das fontes, portanto, os detectores ficaram expostos pelo mesmo tempo nos dois locais. Os resultados de concentração de ^{222}Rn no ar variam de $35 \pm 3 \text{ Bq m}^{-3}$ a $156 \pm 4 \text{ Bq m}^{-3}$, também não foi possível observar correlação com a variação sazonal. As doses obtidas encontram-se abaixo do valor de valor de $2,4 \text{ mSv a}^{-1}$, sugerido pelo *Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica* (UNSCEAR,

2000) para fontes naturais de radiação. Em virtude dos baixos resultados de dose obtidos, para os três cenários avaliados, não se sugere nenhuma medida mitigatória para reduzir a concentração de radônio no ar.

Os resultados obtidos neste trabalho poderão contribuir para um banco de dados sobre a exposição à radiação causada pela inalação do isótopo ^{222}Rn em balneários e termas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALBERIGI, S., PECEQUILO, B. R. S., CAMPOS, M. P. ***Um método alternativo para contagem de traços em detectores sólidos de traços nucleares.*** In: International Nuclear Atlantic Conference – INAC, Santos, 2005.
- AQUINO, R. R.; FERREIRA, A. O.; BRIGITTE R. S. P. ***Estudos preliminares do uso de um plástico comercial brasileiro como detector de traços nucleares para partículas alfa.*** In: Latin American Symposium on Radon And II Symposium on Radon in Brazil, 2014, Poços de Caldas, v. 1. p. 25, 2014.
- AXIOVISION. ***Axio Vision User Guide***, Release 4.8.1, 2009.
- BEIR VI Report – Biological Effects of Ionizing Radiation. ***Health Effects of Exposure to Indoor Radon.*** National Academy Press, Washington D.C., 1999.
- CACCURI, L. S. ***Avaliação da exposição ocupacional ao ^{222}Rn no galpão da salvaguardas do IPEN.*** São Paulo 2007 (Dissertação de Mestrado) Universidade de São Paulo.
- CAMPOS, M. P. ***Avaliação do impacto radiológico provocado por materiais de construção em moradores de casas populares.*** Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 1994.
- CAMPOS, M. P. ***Torônio no ar: avaliação da dose ocupacional.*** Tese (Doutorado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 1999.
- CAMPOS, M. P., PECEQUILO, B. R. S., MAZZILLI, B. P. ***^{222}Rn and ^{212}Pb exposures at a Brazilian spa.*** Radiation Protection Dosimetry, v. 141, p. 210-214, 2010.
- CATELINOIS, O et al. ***Lung cancer attributable to indoor radon exposure in France: impact of the risk models and uncertainty analysis.*** Environ Health Perspect, 114: 1361 – 1366. 2006.
- CAZULA, C. D. ***Dosimetria de Rn-222 no ar em ambientes localizados acima e abaixo do nível do solo.*** Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2015.

COSTA, L. P. ***Estudo da exalação de radônio em placas e tijolos de fosfogesso de diferentes procedências***. Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2011.

DARBY, S et al. ***Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies***. BMJ, 330: 223-227, 2005.

DARBY, S et al. ***Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe***. Scand J Work Environ Health, 32 Suppl1: 1-38, 2006.

EISENBUD, M. ***Environmental Radioactivity***. Orlando: Academic Press Inc, Orlando, 1987.

EISENBUD, M.; KOTIN, P.; MILLER. ***Is beryllium carcinogenic in humans?*** J Occup Environ Med, 39: 205-208. 1997.

ENGE, W. ***Introduction to plastic nuclear track detectors***. Nucl.Tracks, v.4, n.4, p-283-308, 1980.

IAEA, International Atomic Energy Agency. ***National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings, (analytical quality in nuclear applications series no. 33)***. Viena 2013.

IARC, Agency for Research on Cancer. ***Man-made Mineral Fibres and Radon, v. 43***. New York, 1998.

ICRP, International Commission on Radiological Protection. ***Report of the task group on reference man***. Oxford, Pergamon Press: Publication 23, 1975.

ICRP, International Commission on Radiological Protection. ***Human respiratory tract model for radiological protection***. Oxford, Pergamon Press: Publication 66, 1994.

ICRP, International Commission on Radiological Protection. ***Recommendations of the International Commission on Radiological Protection***. Oxford, Pergamon Press: Publication 103. 2007.

ICRP, International Commission on Radiological Protection. ***Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People of Living in Long-term Contaminated Areas After a Nuclear Accident or a Radiation Emergency.*** Oxford, Pergamon Press: Publication 111. 2009.

KENDALL, G. M. SMITH, T. J. ***Doses to organs and tissues from radon and its decay products.*** J Radiol Prot, 22: 389-406, 2002.

KOTRAPPA, P. DEMPSEY, J. C. RAMSEY, R. W. STIEFF, L. R. ***A practical electret passive environmental radon monitor system for indoor radon measurement.*** Health Phys. 58: 461-467. 1990.

KREWSKI, D. LUBIN, J. H. ZIELINSKI, J. M. ALAVANJA, M. ***Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies.*** Epidemiology, 16: 137-145. 2005.

KREWSKI, D. LUBIN, J. H. ZIELINSKI, J. M. ***A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer.*** J Toxicol Environ Health A, 69: 533-597. 2006.

LEMONS, P. S. ***Águas thermaes de Poços de Caldas.*** Belo Horizonte: Imprensa Oficial de Minas Gerais, 1904.

LUBIN, J. H. WANG, Z. Y. BOICE, J. D. XU, Z. Y. ***Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled result of two studies.*** Int J Cancer, 109: 132-137. 2004.

MANOCCHI, F. H., ***Monitoração de Rn-222 nos galpões de armazenamento de rejeitos radioativos do IPEN.*** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MAYYA Y.S., EAPPEN K.P., NAMBIK K. S. V. ***Methodology for Mixed Inhalation Dosimetry in Monazite Areas Using a Twin-cup Dosimeter with Tree Track Detectors.*** Radiation Protection Dosimetry, v77, p. 177-184, 1998.

NCRP-97. National Council on Radiation Protection and Measurements. ***Measurement of Radon and Randon Daughter in Air.*** Nov. 15, 1988.

NEMAN, R. S., ***Medida da contaminação radioativa do ar ambiental por radônio-222 e filhos em residências de Campinas-SP, Brasil***. Campinas, Dissertação de Mestrado. Instituto de Física - Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

NIKEZIC, D et al. ***Measurement of parameters of tracks in CR-39 detector from replicas, Radiation Protection Dosimetry***, Volume 111, Issue 1, 1 August 2004, Pages 93–96, 2004.

NORNC, Naturally Occurring Radioactivity in the Nordic Countries. ***Recommendations: The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden***. 2000.

NRC – National Research Council. ***Comparative Dosimetry of Radon in Mines and Homes, Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, Panel on Dosimetric Assumptions Affecting the Applications of Radon Risk Estimates***. National Academy Press, Washington D.C., 1991.

ONER, F., YIGITOGU, I., YALIM, H.L. ***Measurements of radon concentrations in spa waters in amasya, Turkey***. Radiation Protection Dosimetry, p. 1–4, 2013.

PAULO, S. R. ***Dosimetria ambiental de Rn-222 e filhos: medida da eficiência absoluta do CR-39 levando-se em conta os efeitos do plate-out e fatores ambientais***. Tese (Doutorado), UNICAMP, Campinas, 1991.

PUGLIESI, F. ***Caracterização do polímero Durodon como detector de traços nucleares de estado sólido***. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PYLON ELECTRONICS INCORPORATION. ***Pylon model RN-150 Manual Instruction***, 1992.

RADOLIĆA, V., VUKOVIĆA, B., ŠMITB, G., STANIĆA, D., PLANINIĆA, J. ***Radon in the spas of Croatia***. Journal of Environmental Radioactivity, 83 (2), 191–19, 2005.

SILVA, A.S., DINIS, M.L., & PEREIRA, A.J.S.C. (2016). ***Assessment of indoor radon levels in Portuguese thermal spas***. Radioprotection, 51(4), 249-254.

SILVA, A.S., DINIS, M.L. **Main Mitigation Measures Occupational Exposure to Radon in Thermal Spas.** Occupational Safety and Hygiene VI, p. 425-428, 2018.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. R.; ASMUS, H. E. **Geologia do Brasil, Ministério das Minas e Energia**, p. 501. 1984.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, **The 2000 Report to the General Assembly with Scientific, Annex B: Exposures from natural radiation sources**, p. 90, 115 and 116. New York, United Nations, 2000.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Effects of Ionising Radiation. The 2006 Report to the General Assembly with Scientific.** New York, United Nations, 2008.

US EPA, United States Environmental Protection Agency. **EPA'S Strategy to Reduce Risk of Radon.** Special Report of Journal of Environmental Health. 1993.

VAUPOTI, J., KOBAL, I. **Radon Exposure in Slovenia Spas.** Radiation Protection Dosimetry, Volume 97, Issue 3, 1 November 2001, p. 265–270.

VILLAVERDE, F. L. **Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso.** Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2008.

WHO, World Health Organization. **Internacional Radon Project Survey on Radon Guidelines, Programmes and Activities.** Geneva, 2007.

WHO, World Health Organization. **Hand-book on Indoor Radon: a Public Health Perspective.** Geneva, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.**