



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**



Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

Bruno da Silva Melo

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NO AMBIENTE DE GRUTAS
TURÍSTICAS NA ROTA PETER LUND**

BELO HORIZONTE

2019

Bruno da Silva Melo

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NO AMBIENTE DE GRUTAS
TURÍSTICAS NA ROTA PETER LUND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Orientador: Prof. Dr. Arno Heeren de Oliveira

Co-orientadora: Profa. Dra. Mariza Ramalho Franklin

Área de concentração: Ciências das Radiações

Belo Horizonte

2019

M528a

Melo, Bruno da Silva.

Avaliação da concentração de radônio no ambiente de grutas turísticas na rota Peter Lund [recurso eletrônico] / Bruno da Silva Melo. – 2019.

1 recurso online (122 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Arno Heeren de Oliveira.

Coorientadora: Mariza Ramalho Franklin.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f.115-122.

Bibliografia: f. 107-114.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Radon – Teses. 3. Espeleologia – Teses. 4. Grutas – Teses. I. Oliveira, Arno Heeren de. II. Franklin, Mariza Ramalho. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

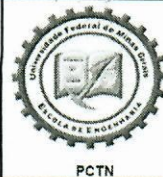
CDU: 621.039(043)

Ficha catalográfica: Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES



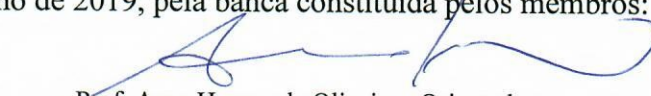
FOLHA DE APROVAÇÃO

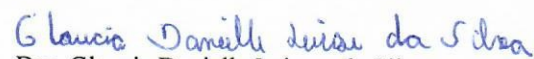
AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NO AMBIENTE DE GRUTAS TURÍSTICAS NA ROTA PETER LUND


BRUNO DA SILVA MELO


Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração CIÊNCIAS DAS RADIAÇÕES.


Aprovada em 31 de julho de 2019, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Arno Heeren de Oliveira - Orientador
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Dra. Glauca Danielle Leirose da Silva
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Dr. Danilo Chagas Vasconcelos
IPEMED


Profa. Talita de Oliveira Santos
Departamento de Anatomia e Imagem-UFMG


Prof. Antônio de Padua Lima Fernandes
Faculdade Pitágoras

Belo Horizonte, 31 de julho de 2019.

Dedico esse trabalho ao meu falecido avô Sr. Pedro Pacheco de Melo. Homem que, em vida, foi extremamente alegre, misericordioso e sábio. Em toda sua humilde sabedoria, ao receber meu convite de formatura a bacharel em engenharia declarou-se orgulhoso em ter, a partir daquele momento, um neto Doutor. Vô Pedro, o caminho está pavimentado. Estou chegando lá.

*“Naquela mesa ele contava histórias, que hoje na memória eu guardo e sei de cor”
(Nelson Gonçalves)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser esteio, conforto e mansidão mesmo quando tudo se aparentava revirado.

Ao meu orientador Dr. Arno Heeren de Oliveira. Obrigado pelos ensinamentos, créditos e pela disponibilidade sempre que solicitado. Ao mestre Zildete Rocha, pessoa dedicada, inteligente e extremamente amável. A minha Co-orientadora Dra. Mariza R. Franklin. Aprendi muito com vocês. Ao Geólogo Walter de Brito por sua dedicação em nossos trabalhos de campo. Meu muito obrigado a esse “Dream Team” do radônio.

Ao professor e espeleologista Dr. Luciano Emerich Faria. Seu amor pela academia, espeleologia e sua dedicação às pesquisas serviram, desde minha graduação, como estímulo e espelho. Em um encontro acadêmico foi luz para a realização desta pesquisa. Obrigado pela parceria e entrega nos nossos trabalhos de campo.

Agradeço ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD-RJ) pela cessão dos SSNTD utilizados nesta pesquisa e pelo laboratório utilizado para a revelação dos filmes.

Ao DEN/UFMG. Docentes, disseses e demais funcionários que foram companhias excepcionais, fazendo uma grande transformação em minha vida. Em especial à professora Dra. Cláudia Bezerra a quem sou muito grato por sua entrega à profissão. As primeiras referências bibliográficas dessa pesquisa surgiram por um empenho extra seu. Obrigado por tudo.

Ao pessoal do ICMBio/SISBio sempre solícitos e compreensíveis. Ao CECAV pelas deliberações. Ao pessoal do GPROP/IEF-MG, em especial à Janaina Aguiar, que desenvolveu seu trabalho com muito empenho e lisura. Obrigado a todos vocês por acreditarem nessa pesquisa e concederem as licenças necessárias.

Agradeço à empresa Bertin Technologies SAS pelo fornecimento das câmaras de ionização utilizadas nesta pesquisa. Em especial a cessão do ALPHAE®.

A todo pessoal das grutas que nos receberam muito bem. Um agradecimento especial à Maria Honorina, apaixonada por seu trabalho e zelosa com a gruta Rei do Mato. À Cintia Palhares, a primeira pessoa a nos receber na gruta da Lapinha e que demonstrou, desde o início, tanto empenho para que a pesquisa acontecesse. Ao Mário Lucio por toda assistência enquanto estivemos na gruta de Maquiné. Aos demais colaboradores das grutas, meu muito obrigado.

Agradeço a minha avó, aos meus pais, irmãos, sogros, cunhados, tios e sobrinhos pela torcida, pelo apoio incondicional e pelo amor que demonstraram sempre. Em especial momento, a todos de Cambridge-ON naquele verão de 2018 que será eternamente inesquecível. Valeu a pena.

Meu sincero agradecimento a minha amada esposa Elisa Pimenta. Essa dissertação é nossa! Fizemos isso juntos. Obrigado por estar ao meu lado e suportar tanta ausência. Te amo. Amo vocês, meus frutos mais preciosos, Clarice e Antonio. Foi, é e sempre será por vocês.

A todo Grupo dos Restos. Aos meus amigos de vida, irmãos por escolha Dr. Deivison Amaral e Dr. Antônio de Pádua, os queridos Ma. Camilla Bof, seu fiel escudeiro Me. Renato Horta e o pequeno Raulzinho. Não preciso falar muito aqui. Nos alternamos locomotivas, sempre um puxando o outro. Assim seguimos em frente.

A minha psicóloga, amiga e confidente Norma Aires. Se estou escrevendo tudo isso aqui muito devo a você. Sua torcida, seus devaneios políticos, seu carinho e profissionalismo. Enfim, devo-lhe tanto, impossível encontrar palavras para agradecer. Norma, sou mestre!

Para encerrar, meu agradecimento especial à CAPES por ser a agência de fomento que viabilizou financeiramente a realização desta pesquisa.

“Não creio, no sentido filosófico do termo, na liberdade do homem. Todos agem não apenas sob um constrangimento externo, mas também de acordo com uma necessidade interior.”

Albert Einstein

RESUMO

A visitação de cavidades subterrâneas, sejam elas demarcadas para fins turísticos ou não, representa um grande potencial turístico-econômico dadas as quase oito mil grutas catalogadas no Brasil atualmente. A presença e quantificação do gás radioativo radônio e de sua progênie não é um assunto contemplado, por exemplo, nos planos de manejo nas grutas classificadas como turísticas. Com pouca ou nenhuma informação clara, os trabalhadores e frequentadores destes locais desconhecem a dose de radiação que recebem e, conseqüentemente, os riscos a que estão expostos. Faz-se importante salientar que a radiação natural é algo recorrente em nosso cotidiano, sendo responsável por cerca de 50% de toda radiação que um ser vivo recebe durante toda sua vida. Esta radiação natural se torna um potencial risco à saúde quando passa a ser confinada em locais de trabalho e moradia, onde ela será necessariamente absorvida por frequentadores locais. Uma vez que o fato de ser irradiado deve ser encarado como algo corriqueiro, conhecer as características do ar e, especificamente a quantidade de radônio nele existente, auxilia na tomada de medidas mitigadoras quando necessário, a fim de se afastar qualquer risco à saúde da comunidade exposta ao gás. As grutas contempladas por essa pesquisa possuem grande prestígio quanto ao seu potencial espeleoturístico sendo utilizadas, por exemplo, em grandes produções televisivas. Foram utilizados quatro métodos para quantificação do radônio nessas grutas. Três métodos de análise de curto prazo, com a utilização de uma câmara de ionização conhecida internacionalmente com a marca AlphaGuard®, um monitor pessoal da marca AlphaE®, e câmaras de difusão de eletretos RadElec, e outro método de medida de médio prazo, utilizando detectores de traços SSNTD. Os resultados apresentados sobre a quantidade do gás radioativo radônio nas grutas Rei do Mato, Do Maquiné e Lapinha, como a concentração superior a 1400 Bq.m⁻³ encontrada em uma das câmaras da gruta Rei do Mato, acima dos 1000 Bq.m⁻³ recomendados pela ICRP, contribuirão com a literatura para futuros projetos, demonstrando se existe algum risco à saúde dos trabalhadores e turistas, incentivando ações mitigadoras quando a dose apresentada e a exposição a esta assim exigir.

Palavras chaves: Radônio, Espeleoturismo, Espeleologia, Grutas, Rota Lund, Cavidades Naturais.

ABSTRACT

The visitation of underground cavities, whether demarcated for tourist purposes or not, represents a great tourist-economic potential given the almost eight thousand caves cataloged in Brazil today. The presence and quantification of radon radioactive gas and its progeny is not a subject, for example, in management plans in caves classified as tourist. With little or no clear information, workers and visitors to these locations are unaware of the radiation dose they receive and, consequently, the risks to which they are exposed. It is important to note that natural radiation is recurrent in our daily lives, being responsible for about 50% of all radiation that a living being receives throughout his life. This natural radiation becomes a potential health hazard when it is confined to workplaces and homes where it will necessarily be absorbed by locals. Since being irradiated should be viewed as commonplace, knowing the characteristics of the air, and specifically the amount of radon in it, assists in taking mitigating measures when necessary in order to avert any risk to community health. exposed to gas. The caves contemplated by this research have great prestige regarding their speleotouristic potential being used, for example, in large television productions. Four methods were used to quantify radon in these caves. Three short-term analysis methods using an internationally known AlphaGuard® brand ionization chamber, an AlphaE® brand personal monitor, and RadElec electret diffusion chambers, and another medium-term measurement method using SSNTD trace detectors. The results presented on the amount of radon radioactive gas in the Rei do Mato, Do Maquiné and Lapinha caves, such as the concentration above 1400 Bq.m⁻³ found in one of the chambers of the Rei do Mato cave, above 1000 Bq.m⁻³ recommended by the ICRP, will contribute to the literature for future projects, demonstrating if there is any risk to the health of workers and tourists, encouraging mitigating actions when the dose presented and exposure requires it.

Keywords: Radon, Speleotourism, Speleology, Caves, Lund Route, Natural Cavities.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS	xvii
1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 RADIOATIVIDADE AMBIENTAL.....	21
3.1.1 Radionuclídeos primordiais	22
3.1.2 Radionuclídeos cósmicos.....	23
3.1.3 Radionuclídeos secundários	23
3.1.4 As séries radioativas	24
3.2 OS RADIONUCLÍDEOS E AS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS.....	25
3.3 O RADÔNIO.....	27
3.3.1 Características físico-químicas do radônio.....	28
3.3.2 Radônio como fonte de radiação natural.....	29
3.3.3 A difusão do radônio: do solo à atmosfera	33
3.3.4 Efeitos do radônio sobre a saúde.....	34
3.3.5 Radônio em locais de trabalho.....	38
3.3.6 Radônio em cavernas e cavidades naturais.....	40
3.3.7 Ações mitigadoras à concentração de radônio	42
3.4 EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO	44
3.4.1 Exposição a partículas carregadas	44
3.4.2 Exposição única, fracionada ou periódica	45

3.5	GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS E UNIDADES	45
3.6	DETECTORES DE RADIAÇÃO	47
3.7	DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE RADÔNIO	48
3.7.1	Detectores sólidos de traços (SSNTD).....	49
3.7.2	Câmaras de ionização.....	51
3.7.3	Câmaras de ionização de eletretos.....	52
3.8	O MICROCLIMA EM AMBIENTES CAVERNÍCOLAS.....	54
3.9	ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ROTA LUND.....	56
3.10	A ESPELEOLOGIA E O ESPELEOTURISMO	59
4	MATERIAIS E METODOLOGIA	61
4.1	ÁREA DELIMITADA PARA ESTUDO	61
4.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	68
4.2.1	Análise com AlphaGuard® - Detecção ativa	68
4.2.2	Análise com AlphaE® - Detecção ativa.....	70
4.2.3	Análise com os detectores SSNTD	72
4.2.4	Análise com as câmaras de eletretos – Detecção passiva	81
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
5.1	CONCENTRAÇÃO DE ²²² Rn – ALPHA GUARD®.....	85
5.2	CONCENTRAÇÃO DE ²²² Rn – ALPHA E®.....	87
5.3	CONCENTRAÇÃO DE ²²² Rn – DETECTORES SSNTD.....	88
5.4	CONCENTRAÇÃO ²²² Rn – CÂMARAS DE ELETRETOS	91
5.5	RESULTADOS CONSOLIDADOS DE TODOS OS MÉTODOS	94
5.6	DETERMINAÇÃO DA DOSE EFETIVA POR INALAÇÃO.....	98
6	CONCLUSÃO	101
7	RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	APÊNDICE A – Dados topográficos gruta Rei do Mato	115

APÊNDICE B – Dados topográficos gruta de Maquiné	116
APÊNDICE C – Imagens fotográficas: trabalho de campo	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Séries radioativas naturais.....	24
Figura 2 – Solubilidade dos gases nobres em água.....	29
Figura 3: Propriedades nucleares do ²²² Rn.....	32
Figura 4 - Emissão do radônio.....	33
Figura 5 - Esquema do funcionamento de um detector SSNTD.....	49
Figura 6 - Cavidades provocadas na superfície – SSNTD.....	50
Figura 7 - Princípio do funcionamento da câmara de ionização.....	51
Figura 8 - Câmaras de difusão com eletretos.....	52
Figura 9 - Esquema de uma câmara de eletretos.	53
Figura 10 - Mapa da Rota de grutas Peter Lund.	57
Figura 11 - Gruta Rei do Mato.....	62
Figura 12 - Entrada da gruta Rei do Mato.	62
Figura 13 - Espeleotemas - Gruta Rei do Mato.....	63
Figura 14 - Gruta de Maquiné.	64
Figura 15 - Espeleotemas – Gruta de Maquiné.....	64
Figura 16 – Espeleotemas – Gruta de Maquiné.....	65
Figura 17 - Gruta da Lapinha.	66
Figura 18 - Gruta da Lapinha.	67
Figura 19 - Funcionamento do AlphaGuard.	68
Figura 20 - AlphaGuard em funcionamento - Gruta Rei do Mato.	69
Figura 21 – Apresentação externa do AlphaE.....	71
Figura 22 – Câmaras de difusão: Detectores SSNTD virgens.	72
Figura 23 - Detectores SSNTD em exposição ao ²²² Rn.....	73
Figura 24 - Pares de SSNTD fixados em um espeleotema.	73
Figura 25 - Posição dos detectores na gruta Rei do Mato.	76
Figura 26 - Posição dos detectores na gruta de Maquiné.....	77
Figura 27 - Detectores SSNTD na gruta Rei do Mato.	79
Figura 28 - Detectores de traço na gruta de Maquiné.....	79
Figura 29 - Detectores SSNTD selados.	80
Figura 30 - Câmaras de difusão E-perm.	81
Figura 31 - Eletretos E-perm.	82
Figura 32 - Leitores SPER-1E durante a análise.....	82

Figura 33 - Quick Calculator Rad Elec.	83
Figura 34 - Equipamentos em funcionamento - Gruta do Maquiné.	83
Figura 35 - Câmara de eletretos em funcionamento.	84
Figura 36 - Monitoramento do espectro local.	84
Figura 37 - Concentração de radônio – AlphaGuard.	86
Figura 38 - Concentração de radônio – AlphaGuard.	87
Figura 39 - Gráfico de profundidade e concentração SSNTD – Maquiné.	90
Figura 40 - Gráfico de profundidade e concentração SSNTD – Maquiné.	90
Figura 41 - Gráfico: Concentração de radônio na gruta do Maquiné.	95
Figura 42 - Gráfico: Concentração de radônio na gruta da Lapinha.	97
Figura 43 - interior da câmara suporte do SSNTD.	105
Figura 44 - exterior da câmara suporte do SSNTD.	105
Figura A-1: Janela na entrada da gruta de Maquiné.	117
Figura A-2: Acesso a entrada principal da gruta de Maquiné.	117
Figura A-3: Espeleotemas no interior da gruta de Maquiné.	118
Figura A-4: Portão de entrada - Gruta de Maquiné.	118
Figura A-5: Gerente da gruta Rei do Mato com a equipe de pesquisadores.	119
Figura A-6: Gerente da gruta Rei do Mato com a equipe de pesquisadores.	119
Figura A-7: Espeleotemas no interior da gruta Rei do Mato.	120
Figura A-8: Espeleotemas no interior da gruta Rei do Mato.	120
Figura A-9: Espeleotema em formação há 3000 anos na gruta Rei do Mato.	121
Figura A-10: Espeleotema conhecido como "O Papa" na gruta Rei do Mato.	121
Figura A-11: Grupo de pesquisa no interior da gruta Rei do Mato.	122
Figura A-12: Grupo de pesquisa no interior da gruta Rei do Mato.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Famílias radioativas naturais.....	24
Tabela 2 - Teor de Urânio	26
Tabela 3 - Decaimentos do Polônio-218.	30
Tabela 4 - Espectro energético – decaimento rádio.	31
Tabela 5 - Espectro energético – decaimento radônio.	31
Tabela 6 - Energia linear transferida (LET).	35
Tabela 7 - Riscos de exposição ao radônio.	37
Tabela 8 – Concentração de ²²² Rn no subsolo.	38
Tabela 9 - Quantificação de ²²² Rn em locais de trabalho.	39
Tabela 10 - Variação na concentração de radônio (Bq.m ⁻³).....	42
Tabela 11 - Métodos de mitigação.	43
Tabela 12 - Tipos de radiação e fator de qualidade RBE (Q).....	46
Tabela 13 - Detectores SSNTD fixados na gruta Rei do Mato.	75
Tabela 14 - Detectores SSNTD fixados na gruta de Maquiné.....	78
Tabela 15 – Tempo de detecção dos SSNTD.	80
Tabela 16 - Concentração de radônio nas grutas: AlphaGuard®.....	85
Tabela 17 - Resultados AlphaGuard (20 horas).	85
Tabela 18 - Resultados AlphaE (20 horas).	87
Tabela 19 – Resultados SSNTD: Gruta Rei do Mato.	88
Tabela 20 - Resultados SSNTD: Gruta de Maquiné.....	89
Tabela 21 - Resultados Câmara Eletretos – Gruta Rei do Mato.	91
Tabela 22 - Resultados Câmara de Eletretos - Gruta do Maquiné.....	92
Tabela 23 - Resultados Eletretos - Gruta da Lapinha.	92
Tabela 24 - Espectrometria gruta do Maquiné.	93
Tabela 25 - Espectrometria gruta da Lapinha.	94
Tabela 26 - Resultados consolidados da concentração de Radônio.....	94
Tabela 27 - Resultados consolidados da concentração de Radônio.....	95
Tabela 28 - Resultados consolidados da concentração de Radônio.....	96
Tabela 29 - Dose Efetiva anual: exposição de 240 horas/ano.	99
Tabela 30 - Dose Efetiva anual: exposição de 480 horas/ano.	99
Tabela 31 - Dose Efetiva anual: exposição de 720 horas/ano.	99
Tabela 32 - Dose Efetiva anual: exposição de 2000 horas/ano.	99

Tabela 33 - Concentrações de radônio em outros estudos.....	98
Tabela A-1: Levantamento de dados topográficos na gruta Rei do Mato.....	115
Tabela A-2: Levantamento de dados topográficos na gruta de Maquiné.	116

LISTA DE ABREVIATURAS

Bq.m⁻³ – Becquerel por metro cúbico

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CECAV – Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

CNC – Cadastro Nacional de Cavernas

CPRM-BH – Serviço Geológico do Brasil em Belo Horizonte

CR-39 – Columbia Resine 39

DEN – Departamento de Engenharia Nuclear

EIC – Electret Ion Chamber

GPROP – Gestão de Projetos e Pesquisas do IEF/MG

IAEA – International Agency of Energy Atomic

ICMBio – Instituto Chico Mendes da Biodiversidade

ICRP – International Commission on Radiological Protection

IEF/MG – Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais

IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria

KeV – Kilo-elétron Volt

LET – Linear Energy Transfer

MeV – Mega-elétron Volt

MNEPL – Monumento Natural Estadual Peter Lund

MNEGRM – Monumento Natural Estadual Gruta Rei do Mato

PETAR – Parque Estadual do Alto do Ribeira

PHE – Public Health England

RBE – Relative Biological Effectiveness

SEE – Sociedade Excursionista Espeleológica

SBE – Sociedade Brasileira de Espeleologia

SISBio – Sistema de atendimento à Distância do ICMBio

SSNTD – Solid-State Nuclear Track Detector

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

USEPA – United States Environmental Protection Agency

1 INTRODUÇÃO

A descoberta da emissão de radiação por certos elementos químicos feita por Becquerel em 1896 marcou o início dos estudos dos núcleos atômicos e suas estruturas. Após anos de investigações feitas por diversos cientistas, pôde-se observar que radionuclídeos emitiam naturalmente diversos tipos de radiação que se diferenciavam pela penetrabilidade no meio material (ARAMBURU E BISBAL, 1994). Ainda de acordo com Aramburu & Bisbal (1994), os radionuclídeos naturais são os principais responsáveis pelo percentual de dose radioativa recebida pelo homem ao longo de sua vida. São reconhecidos como radionuclídeos naturais aqueles elementos que são fontes de emissões radioativas sem que haja interferência do homem, ocorrendo de forma espontânea.

De acordo com D'Elboux (1984, *apud* GOUVEA, 1996) descreve que os radionuclídeos naturais são encontrados no meio ambiente de quase todas as regiões brasileiras e podem estar associados a minerais não radioativos. A presença dos elementos urânio e rádio na crosta terrestre tornam natural a existência do único radionuclídeo encontrado no estado gasoso, o radônio (^{222}Rn), a partir do decaimento desses radionuclídeos. A migração do gás é influenciada por diversos fatores, principalmente pela permeabilidade do solo (AGARD E GUNDERSEN, 1993).

De acordo com a ICRP (1994), dentre os descendentes do urânio e tório encontrados como formadores da radiação natural de fundo, o ^{222}Rn é o que merece maior atenção. Apesar de pouco reativo (característica que lhe confere um lugar na família dos gases nobres), o ^{222}Rn é radioativo e descendente do decaimento natural do urânio-238 (^{238}U). Outros fatores que apontam riscos de exposição humana ao radônio se devem ao fato deste ser um gás insípido, inodoro e incolor, sendo pouco perceptível aos sentidos e ainda denso, o que garante sua presença em lugares profundos e com baixa ventilação. O ^{222}Rn possui meia-vida curta, cerca de 3,82 dias, é tido como substancial risco à saúde humana, principalmente quando ocorre o seu acúmulo em espaços confinados como casas, túneis, minas, cavernas e grutas, ou quando o tempo de exposição ao gás é suficientemente longo (ICRP, 1994).

Em alguns países como no Canadá, Estados Unidos, França, e Austrália a concentração de radônio em locais confinados é rigorosamente controlada. Publicações sobre a concentração ou exposição ao ^{222}Rn em cavernas e grutas turísticas não são recorrentes. Há um importante estudo publicado por Alberigi (2006) que avaliou a concentração de ^{222}Rn nas cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), localizado no estado de São Paulo, que serviu como importante instrumento de consulta e referência para a realização deste trabalho. Tal pesquisa apontou concentrações entre 153 e 6607 Bq.m⁻³. Outro estudo, desta vez publicado por GOUVEA (1996), apresentou a quantificação de radônio em grutas de Minas Gerais e outros dois estados, mas sem discriminar a localidade das mesmas.

O Brasil possui um enorme potencial espeleoturístico (visitação em cavidades como grutas ou cavernas). De acordo com a SBE (2019), no Brasil são catalogadas atualmente 7862 cavernas através do Cadastro Nacional de Cavernas (CNC). Só o estado de Minas Gerais possui mais de 2000 cavidades inseridas nesse cadastro. Conforme divulgado pelo Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais (IEF), no ano de 2017 cerca de 88.000 pessoas visitaram a grutas da Rota Lund em Minas Gerais, que compreende, além de outras estruturas turísticas, o Parque estadual do Sumidouro que abriga a Gruta da Lapinha, o Monumento Natural Gruta Rei do Mato onde está localizada a Gruta de mesmo nome e o Monumento Natural Peter Lund, que abriga a Gruta de Maquiné. Esse número já foi muito superior. Para efeito comparativo, em 2014 mais de 127.000 pessoas visitaram o circuito, demonstrando o potencial turístico envolvendo esses espaços naturais públicos (MAGALHÃES, 2017). De acordo com as administrações dessas grutas, os três complexos turísticos juntos possuem cerca de 70 funcionários. Desses, cerca de 30 são guias turísticos que acompanham grupos nas incursões às cavidades sem qualquer regularidade, sendo difícil a descida por mais de duas vezes num mesmo dia, de acordo com as informações prestadas pela própria administração. O número de espeleologistas que frequentam essas cavidades, bem como o tempo em que eles ficam expostos ao ^{222}Rn é de difícil controle, deixando essa importante informação em aberto. Preencher essa lacuna é o principal objetivo desse trabalho, fazendo conhecida a concentração do Radônio nas cavidades descritas anteriormente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Medir a concentração do gás ^{222}Rn no interior de grutas turísticas na Rota Lund em Minas Gerais, Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar métodos passivos e ativos na detecção da concentração de radônio.
- Avaliar a dose efetiva a que estão sujeitos os trabalhadores das grutas turísticas.
- Comparar a concentração do gás encontrada na região pesquisada com outras regiões encontradas na literatura bem como os limites estabelecidos pelas agências de proteção radiológica.
- Comparar as concentrações encontradas pelas diferentes metodologias (câmaras de ionização, de eletretos e detetores de traço) utilizadas nesta pesquisa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RADIOATIVIDADE AMBIENTAL

Os primeiros registros de efeitos da radiação natural em humanos datam do século XVI em trabalhadores de minas, mas somente no século XIX é que ocorre a descoberta da radiação, quando Becquerel realizou uma série de experimentos que envolviam elementos que emitiam energia espontaneamente, até então desconhecidos (WILKENING, 1990). Desde então, sabe-se que os núcleos atômicos encontrados na natureza podem ser estáveis ou instáveis. Os núcleos estáveis são de elementos com núcleos em equilíbrio energético, enquanto os núcleos instáveis são aqueles que emitem energia de forma espontânea em busca de se alcançar tal equilíbrio. Segundo Aramburu & Bisbal (1994), os núcleos instáveis são conhecidos como radionuclídeos ou núcleos radioativos por sua capacidade de emissão natural. A existência de núcleos estáveis é uma consequência direta das forças nucleares que são muito mais intensas que as forças eletromagnéticas. A relação entre o número de nucleons, ou seja, a quantidade de prótons e nêutrons de um núcleo deve obedecer a um limite e está diretamente ligada a estabilidade dos átomos (ARAMBURU & BISBAL, 1994). Esse limite está intimamente ligado às forças nucleares, responsáveis diretas pela estabilidade nuclear.

A instabilidade dos núcleos é responsável pela radioatividade natural de um elemento e é formada por dois tipos de decaimento radioativo: a instabilidade dinâmica, onde os núcleos se dividem gerando partículas menores, conhecido como decaimento alfa e as transições nucleares, que emitem elétrons e pósitrons ocasionando o decaimento beta. O estudo da radioatividade se faz em duas frentes: a radioatividade natural e a radioatividade artificial, onde reações nucleares forçadas liberam quantidades consideráveis de energia. Um decaimento alfa corresponde a emissão de uma de um átomo de hélio-4, com dois prótons e dois nêutrons, enquanto um decaimento beta corresponde à emissão de partículas bem mais leves, os elétrons e pósitrons. A radiação gama não é particulada e corresponde à emissão de ondas eletromagnéticas muito curtas e conseqüentemente com muita energia, que podem ou não serem emitidas concomitantemente com uma radiação particulada.

As fontes de radiações naturais provêm dos raios cósmicos e dos radionuclídeos naturais originados na crosta terrestre, que se distribuem nos diversos sistemas geológicos (SANTOS, 2015).

3.1.1 Radionuclídeos primordiais

De acordo com Aramburu & Bisbal (1994), a existência terrestre é datada entre 3 e 4 milhões de anos e aceita-se, geralmente, que os isótopos de todos os elementos se formaram a partir de um plasma gasoso, submetidos a elevadas temperaturas. Alguns desses isótopos eram radioativos. Outra parte destes isótopos, com períodos relativamente pequenos em relação a idade da terra, foram desaparecendo com o tempo. Outros, com períodos de desintegração não desprezível frente a idade da terra continuam contribuindo com a radioatividade natural, junto com seus descendentes (ARAMBURU & BISBAL, 1994). Esses radionuclídeos primordiais formam três séries radioativas naturais, conhecidas como famílias radioativas. São elas a família do tório, do urânio-rádio e do urânio-actínio. Sabe-se que todos os elementos finais dessas famílias são isótopos estáveis do chumbo. As fontes de radiação terrestre mais importantes são o potássio-238 e o rubídio-232. Além dos radionuclídeos primordiais, outras duas formas são usadas para a classificação dos elementos radioativos. São ainda considerados os radionuclídeos cósmicos e radionuclídeos secundários.

O urânio é um elemento primordial (pai) e é a partir dele que são gerados outros elementos igualmente radiativos ou não. O isótopo ^{235}U gera radônio com massa atômica igual a 219 e uma meia-vida muito pequena, o que o torna difícil de ser detectado na natureza. Já o ^{238}U decai formando, dentre outros filhos, o ^{222}Rn , isótopo do radônio com meia-vida próxima a 4 dias, forma na qual o radionuclídeo é encontrado na natureza. Segundo Santos (2015), a abundância isotópica natural do ^{238}U corresponde a 99,274% de todo urânio encontrado na crosta terrestre.

O urânio ocorre naturalmente na crosta terrestre em concentrações na faixa de 0,08 a 8,2 ppm em volume. É encontrado em rochas e minérios, areia monazítica, águas salgadas e doces. Nas águas, está presente em concentrações em torno de 0,01 a 500 ppb, eventualmente 1 ppm (CAMARGO, 1994 *apud* SANTOS, 2015). Pode estar

na forma dissolvida, adsorvida e absorvida. Seu transporte e mobilidade dependem de quatro fatores principais: potencial de oxirredução, pH, agentes complexantes e materiais adsorventes presentes na água (CAMARGO, 1994 *apud* SANTOS, 2015).

De acordo com Santos (2015), o urânio encontra-se retido nos minerais formadores de rochas, incorporado nos minerais secundários e acessórios ou em altas concentrações formando seus próprios minerais. Alguns compostos de urânio são: óxidos, oxi-hidróxidos, óxidos complexos, carbonatos, sulfatos, fosfatos, arseniados, vanadatos e silicatos. O urânio se concentra em rochas ácidas com alto teor de silício. Os mais importantes minerais portadores de urânio são a pitchblenda (cuja composição se aproxima de U_3O_8) e a carnotita, composto de vanadato de potássio e uranila (RIBEIRO, 2007).

3.1.2 Radionuclídeos cósmicos

Os raios cósmicos são responsáveis por pouco menos da metade da exposição do homem à radiação natural externa. Ainda que ninguém escape desse bombardeio invisível, algumas partes do globo terrestre são mais afetadas do que as outras. As zonas polares recebem um fluxo maior de partículas do que as zonas equatoriais. De acordo com a UNSCEAR (2010), a radiação cósmica pode ser dividida de acordo com a origem, a energia, tipo e densidade das partículas. Ainda segundo a UNSCEAR (2010), existem dois diferentes tipos de radiação cósmica: a radiação cósmica galáctica e a radiação cósmica solar. Os principais radionuclídeos produzidos por raios cósmicos são o berílio-10, o carbono-14, o hidrogênio-3, o sódio-22, o enxofre-35, o berílio-7, o fósforo-32 e o cloro-39 (ARAMBURU & BISBAL, 1994).

3.1.3 Radionuclídeos secundários

São formados pela progênie dos elementos considerados primordiais, sendo toda a família abaixo dos elementos chamados de “pais”, normalmente o urânio e o tório. A progênie também é conhecida como “filhos”.

3.1.4 As séries radioativas

O ^{222}Rn é um radionuclídeo secundário, descendente do decaimento de radionuclídeos primordiais que geram famílias radioativas naturais. As séries radioativas são sequências de decaimentos que geram outros elementos estáveis ou não. As três famílias radioativas naturais são apresentadas na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Famílias radioativas naturais.

Número mássico (A)	Nome da série	Primeiro término	Último término
4n	Tório	$^{232}\text{Th}_{90}$ (1,41x10 ¹⁰ anos)	$^{208}\text{Pb}_{82}$
4n + 2	Urânio-rádio	$^{238}\text{U}_{92}$ (4,47x10 ⁹ anos)	$^{206}\text{Pb}_{82}$
4n + 3	Urânio-actínio	$^{235}\text{U}_{92}$ (7,04x10 ⁸ anos)	$^{207}\text{Pb}_{82}$

Fonte: adaptado de Aramburu, 1994.

Figura 1 - Séries radioativas naturais



Fonte: adaptado de Aramburu & Bisbal (1994).

A partir da equação com relação a variação do número de massa, é possível saber a qual família radioativa pertence determinado radionuclídeo. As equações são apresentadas na primeira coluna da Tabela 1. O ^{222}Rn é descendente da família urânio-rádio, como mostra a equação abaixo:

$$A = 4n + 2$$

$$A(\text{radônio}) = (4 \times 55) + 2$$

$$A(\text{radônio}) = 222$$

Os decaimentos dos elementos primordiais demandam muitas etapas. O ^{235}U passa por onze etapas de desintegração, enquanto o ^{238}U passa por quatorze dessas etapas. Como se pode perceber, nos três casos as famílias de desintegração iniciam-se com um radionuclídeo primordial com meia-vida muito longa, e terminam com formas estáveis do chumbo (SANTOS, 2015).

O radônio possui como isótopos principais o ^{222}Rn , ^{219}Rn e ^{220}Rn . Os dois últimos possuem a meia-vida muito pequena, com 3,9 e 54,5 segundos respectivamente. Devido a sua alta instabilidade o mais relevante isótopo do radônio encontrado de forma natural é o ^{222}Rn , que possui meia-vida de cerca de quatro dias. Sendo assim, considera-se que o radônio encontrado na natureza possui o número de massa igual a 222.

A série de decaimentos apresentada na Tabela 2 serve como referência pois, em um único decaimento, podem ocorrer mais de um tipo de emissão alfa, beta ou mesmo gama.

3.2 OS RADIONUCLÍDEOS E AS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS

Uma propriedade intrínseca dos nuclídeos das séries radioativas do urânio é que os filhos destes elementos primordiais são também radioativos. Assim, em um sistema que contém urânio que tenha permanecido sem perturbação física ou química por alguns milhões de anos, um estado de equilíbrio secular foi estabelecido entre as abundâncias de sucessivos pais e filhos nas cadeias de decaimento do urânio e do

tório de tal forma que a taxa de decaimento de cada radionuclídeo filho da cadeia tenha se igualado ao pai (DICKIN, 2005). Ainda de acordo com Dickin (2005), durante processos geológicos como erosão, sedimentação, fusão e cristalização os nuclídeos das séries radioativas de decaimento podem ser fracionados em relação aos demais, devido a variações na sua química ou na estrutura local que ocupam. Isso resulta em um estado de desequilíbrio secular. Esta situação pode ser utilizada em duas diferentes formas como ferramenta de datação chamadas de “excesso de filhos” e “deficiência de filhos”.

Na Tabela 2 abaixo é possível encontrar as médias mundiais para o teor de urânio em leitos de rochas relevantes:

Tabela 2 - Teor de Urânio

Média global de urânio em rochas		
	Tipos de Rochas	Conteúdo médio de Urânio (ppm)
Rochas Ígneas	Granitos	4,8
	Basaltos	0,6
Rochas Sedimentares	Xistos Negros ricos em orgânicos	8,2
	Folhelhos	3,5
	Calcários	2,0

Fonte: Gillmore *et al.* (2000).

Como descrevem Gundersen *et al.* (1992), Schultz *et al.* (1992) e Brill *et al.* (1994), embora a maioria das rochas carbonáticas (calcárias) têm baixo teor de urânio, os solos e resíduos derivados deles podem, muitas vezes, conter alto teor em urânio e rádio (*apud* GILLMORE *et al.*, 2000). Em leitos carbonáticos, o urânio e o rádio podem ser absorvidos em revestimentos de óxidos férricos. Ainda de acordo com Gillmore *et al.* (2000), há ocorrência de rádio em material orgânico em solos associados de ambientes cársticos e cavernícolas. Em processos de intemperismo rochosos, o urânio, e conseqüentemente o radônio, podem ser liberados de depósitos secundários. Acredita-se que cerca de 70% do gás formados nesses depósitos

escapam para a atmosfera (FAULKNER & GILLMORE 1995 apud GILLMORE *et al.* 2000). Embora os níveis mais altos de radônio sejam provenientes de rochas com alto teor de urânio, uma porção maior do gás formado é liberada de minérios secundários de urânio, que tendem ocorrer em rochas fraturadas. Essas fraturas permitem o exalar do radônio gerado (FAULKNER & GILLMORE 1995 apud GILLMORE *et al.* 2000). Conforme apresentam Gillmore, *et al.* (2000), a presença do radônio no meio ambiente está em função complexa da geologia, meteorologia, tipos de construções e hábitos sociais (diferentes tipos de habitação, formas de construção, horas totais de enclausuramento e etc). Não existem, porém, muitos levantamentos correlacionando detalhamentos geológicos associados à presença do radônio, especialmente em comparações e consequências humanas em particulares dosagens (GILLMORE *et al.*, 2000).

3.3 O RADÔNIO

No final do século XIX, cientistas como o casal Pierre e Marie Curie e Ernest Rutherford já identificavam que no ar em torno de amostras sólidas radioativas se encontravam variáveis níveis de radioatividade. Até então só se conhecia a radioatividade em compostos sólidos e suas soluções. A este fenômeno nomearam como uma “emanação do” e complementavam com o nome do elemento sólido em questão (AFONSO, 2009). Adiante, Afonso (2009) diz que com o passar do tempo essas emanações foram denominadas conforme o elemento de origem como radônio, que seria proveniente do rádio, torônio, proveniente do tório e actinônio, proveniente do actínio. Após estudos sobre os isótopos, percebeu-se que as emanações se tratavam sempre do mesmo elemento e, com isso, percebeu-se que as emanações do rádio, chamadas de radônio, possuíam diferentes números de massa (AFONSO, 2009). Desde então, soube-se que aquelas emanações na verdade se tratavam de um único elemento radioativo em estado gasoso, até hoje reconhecido como único neste estado físico, o radônio. Por possuírem meias-vidas muito curtas, desconsidera-se neste estudo, pela dificuldade em suas quantificações, os demais isótopos e considera-se apenas os átomos de radônio cuja massa é igual a 222, o ^{222}Rn .

O radionuclídeo ^{222}Rn é, portanto, um elemento radioativo secundário, fruto do

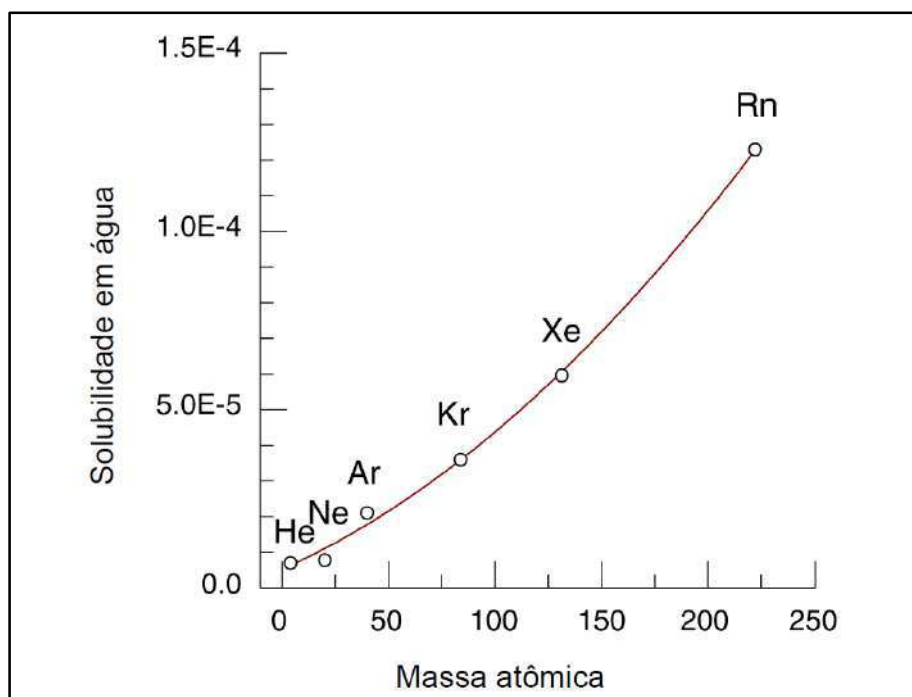
decaimento do ^{226}Ra que gera, além de um átomo do elemento gasoso, uma partícula alfa. Por sua vez, o ^{222}Rn decai gerando uma progênie igualmente radioativa.

O ^{222}Rn provém da radioatividade natural do urânio contido no solo, rochas e águas (USEPA, 2016). Os radionuclídeos provenientes da radioatividade natural contribuem com cerca de 70% da dose de radiação anual recebida por pessoa devido à exposição à radiação natural. Sabe-se que a contribuição da série do urânio-235 na dose total é muito baixa. Dessa maneira, essa série não é levada em consideração na determinação de dose (GONZÁLEZ-CHORNET E GONZÁLEZ-LABAJO, 2004, apud VASCONCELOS, 2010).

3.3.1 Características físico-químicas do radônio

O ^{222}Rn é um gás insípido, inodoro e incolor à temperatura ambiente. Quando resfriado abaixo de seu ponto de fusão, ele exibe uma fosforescência brilhante que se torna avermelhada a cerca de $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sua densidade é cerca de 8 vezes maior que a do ar, com $1,217\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ a 1 atm e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo o gás mais denso conhecido (AFONSO, 2009). Os pontos de fusão e ebulição do ^{222}Rn são muito baixos, $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente, quando comparado a compostos com massa molar similar (AFONSO, 2009). É pouco solúvel em água, mas é o mais solúvel dentre todos os gases nobres, conforme apresentado no gráfico abaixo.

Figura 2 – Solubilidade dos gases nobres em água.



Fonte: Risk Assessment of Radon in Drinking Water (1999).

Embora pouco reativo, sua primeira energia de ionização ($1037 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) é baixa o bastante para que ele reaja com o flúor. Em 1962, foi sintetizado o primeiro composto com ^{222}Rn , batizado como fluoreto de radônio, mas a meia-vida muito curta do elemento radioativo dificultaram os estudos sobre a química do composto formado por esse gás (AFONSO, 2009).

3.3.2 Radônio como fonte de radiação natural

O ^{222}Rn e seus produtos de desintegração como o ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e o ^{214}Po , são a causa da maior parte da dose de radiação natural recebida pelo homem no decorrer de sua vida. De acordo com Santos (2015), a progênie do ^{222}Rn são elementos encontrados no estado sólido, quimicamente ativos e que possuem meia-vida relativamente curta. O primeiro filho do decaimento alfa do ^{222}Rn são elementos encontrados no estado sólido, quimicamente ativos e que possuem meia-vida relativamente curta. O primeiro filho do decaimento alfa do ^{222}Rn , o polônio (^{218}Po), decai para o chumbo (^{214}Pb) e para o astatínio (^{218}At) com emissão de partículas alfa e beta, respectivamente. A tabela 3 apresenta os produtos do decaimento do polônio:

Tabela 3 - Decaimentos do Polônio-218.

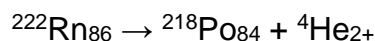
DECAIMENTOS DO ^{218}Po			
Tipo de decaimento	(%)	Energia das partículas (MeV)	Produto do decaimento (filho)
Alfa (α)	99,98	6.115	^{214}Pb
Beta (β)	0,02	0.265	^{218}At

Fonte: KAERI (2019).

O elemento Po possui sete isótopos que se diferem de acordo com as séries de decaimento a que pertencem. Quase todos os isótopos do Po possuem meia-vida curta, com exceção ao ^{210}Po que possui cerca de 138 dias (AFONSO, 2011). Ainda de acordo com Afonso (2011), o polônio aparece no ar, em partículas aerossóis, devido a desintegração do radônio e após a calcinação das rochas fosfáticas contendo urânio e tório.

A concentração dos filhos do ^{222}Rn em locais fechados ou de baixa circulação de ar é conhecida como fator de equilíbrio (F), e é definida a partir da razão entre a concentração em equilíbrio equivalente de radônio e a concentração atual de radônio, ou a razão entre a atividade dos filhos e a atividade do ^{222}Rn . Este fator é utilizado para estimativa de dose de radiação (UNSCEAR, 2000 *apud* ALBERIGI, 2011). De acordo com a literatura, o valor de 0,4 têm sido adotado como F de forma forçada, pois flutuações locais e temporais como ventilação, concentração e distribuição aerossóis podem afetar a concentração dos filhos e a utilização de um único fator em diferentes locais de exposição, como residências, minas e cavernas pode resultar em interpretações incorretas para a dose acumulada de inalação (ALBERIGI, 2011). Para Alberigi (2011), a utilização do fator de equilíbrio é encontrada na literatura num range entre 0,04 e 0,95, tendo como média F igual a 0,5. A tese da autora demonstra que F com o valor de 0,5 se aproxima mais da realidade. Alberigi (2011) sinaliza, ainda, que o valor de 1 para F seria definido para o pior cenário que simula uma situação extrema de 52 semanas de trabalho onde a dose efetiva anual seria acima de 10 mSv.a^{-1} .

Cada decaimento α do ^{222}Rn gera, além da partícula α , um átomo de ^{218}Po :



As partículas α são ionizantes, o que significa que elas têm energia suficiente, quando em interação com a meio.

Segundo Aramburu & Bisbal (1994), o decaimento α só é possível para núcleos com número de massa superior a 150, com menor probabilidade para átomos com número de massa inferior. Diferentemente da emissão de partículas beta (β), as partículas α são emitidas em um discreto espectro de energia, similar ao espectro de prótons em átomos excitados (LAMARSH, 2001). Isso significa que cada elemento que decai emitindo partículas α possui em espectro de energia conhecido. O ^{226}Ra decai para ^{222}Rn emitindo 94,45% das partículas alfa com energia igual a 4.870 MeV. Já o ^{222}Rn decai para ^{218}Po com uma energia de 5.590 MeV em 99,92% das partículas emitidas no decaimento. Nas Tabelas 4 e 5 a seguir, é possível analisar os espectros de energia das partículas alfa para o decaimento do rádio e do radônio:

Tabela 4 - Espectro energético – decaimento rádio.

ESPECTRO DAS PARTÍCULAS ALFA – DECAIMENTO ^{226}Ra	
Energia da Partícula α (MeV)	Número relativo de partículas (%)
4.870	94,45
4.684	5,55

Fonte: adaptado de Aramburu & Bisbal, 1994.

Tabela 5 - Espectro energético – decaimento radônio.

ESPECTRO DAS PARTÍCULAS ALFA – DECAIMENTO ^{222}Rn	
Energia da Partícula α (MeV)	Número relativo de partículas (%)
5.590	99,92
5.079	0,08

Fonte: adaptado de Aramburu & Bisbal, 1994.

Quando o ^{226}Ra decai, a partícula α é ejetada com um valor discreto e característico de energia cinética e o átomo de radônio é submetido ao efeito recuo que o desloca do mineral ou da molécula onde o ^{226}Rn desintegrou (SANTOS, 2015). Apenas os átomos de ^{222}Ra gerados na superfície ou nas microfissuras das fases minerais têm a capacidade de se libertar, sendo que os produzidos no interior dos minerais ficam aprisionados na malha cristalina (SANTOS, 2015). O processo de escape do radônio dos materiais sólidos é chamado de *emanação*.

Para a maioria dos solos, algo entre 10% e 50% do radônio produzido por decaimento escapa do grão mineral e entra nos poros (UNSCEAR, 2000). A *emanação* do radônio é influenciada pela granulometria dos materiais, pela distribuição mineralógica do rádio e pelo teor de água nos interstícios dos grãos (UNSCEAR, 2000). Geralmente o fator de *emanação* do radônio é inversamente proporcional ao tamanho do grão (UNSCEAR, 2000). UNSCEAR (2000) explica que a *exalação* depende, principalmente, da permeabilidade ou da presença de poros interconectados. Materiais como a argila tendem a ser impermeáveis e os materiais com granulometria mais grossa, permeáveis.

Na Figura 3 a seguir, são apresentadas as propriedades nucleares gerais do ^{222}Rn de acordo com a *Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)*:

Figura 3: Propriedades nucleares do ^{222}Rn .

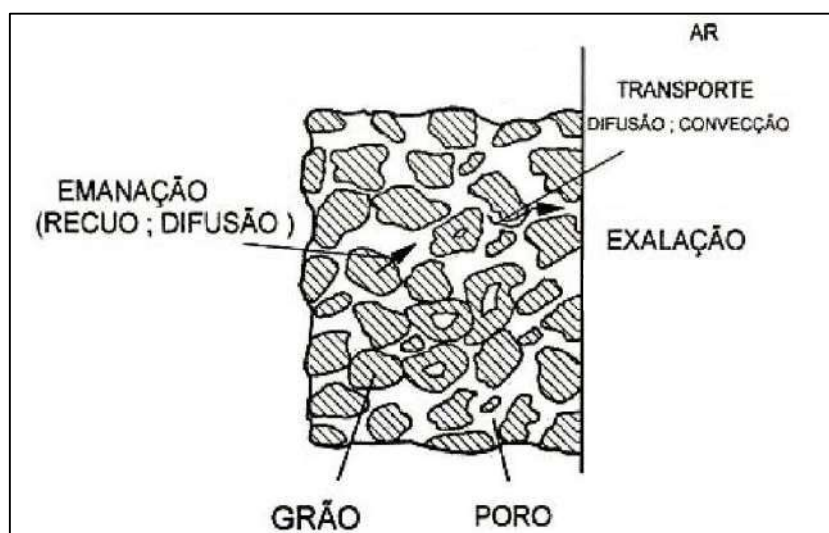
86-Rn-222			
Propriedades Nucleares			
Massa Atômica	222.017578246 ± 0.000002492 u		
Excesso de Massa	16.374031 ± 0.002321 MeV		
Energia de ligação	7.694489 ± 0.00001 MeV		
Decaimento Beta	0.024269 ± 0.02112 MeV		
$E_{\text{ex}}(\text{keV})$	J_{π}	Meia-vida	Decaimento
0.0	0+	3.8235 d (0.0003)	α : 100%

Fonte: adaptado de KAERI (2019).

3.3.3 A difusão do radônio: do solo à atmosfera

De acordo com a literatura publicada sobre o processo de transporte do radônio, ficou estabelecido que esse movimento desse elemento através do solo para a atmosfera ocorre, predominantemente, por difusão molecular (SCHERY et al. 1984, NAZAROFF, 1992 apud BASKARAN, 2016). O fenômeno de transporte de difusão consiste na transferência das moléculas de zonas com maior concentração para áreas com menor concentração dessas moléculas. De acordo com Baskaran (2016), a movimentação do radônio do solo à atmosfera obedece a lei de Fick, que afirma que a densidade do fluxo de radônio é linearmente proporcional ao seu gradiente de concentração. Espera-se que a taxa de movimento do radônio no solo seja lenta em comparação com o movimento em meio homogêneo como o ar, por causa dos caminhos tortuosos ao redor das partículas e relativo menor volume de fluidez (BASKARAN, 2016). Ainda conforme Baskaran (2016), os coeficientes de difusão de radônio estão diretamente ligados à posição do radônio, que terá relação direta aos tipos de solo.

Figura 4 - Emissão do radônio.



Fonte: Porstendorfer apud Santos (2010).

Como mostra a Figura 4, após a emissão através do grão, o transporte ou convecção do ^{222}Rn para a atmosfera dependerá da permeabilidade, ou seja, da interconexão entre os poros no solo ou rocha para que ela ocorra. Nos materiais de pouca permeabilidade, o transporte do gás do solo para a atmosfera ocorre por

difusão. Segundo Neves (2004) *apud* Santos (2010), quando a granulometria do solo é maior, o transporte do ^{222}Rn ocorre por convecção.

Uma vez na atmosfera, o ^{222}Rn irá penetrar em locais de trabalho, residências, cavidades naturais por difusão e convecção. A diferença de densidade para o ar atmosférico será um facilitador para que ele se concentre nos locais mais profundos e fechados.

3.3.4 Efeitos do radônio sobre a saúde

Conforme Afonso (2009), existem registros sobre a saúde dos trabalhadores de minas que continham material radioativo mesmo antes do início dos estudos sobre a da radioatividade. Sabe-se que no início do século XVI, muitos desses trabalhadores morriam precocemente com problemas respiratórios, mas somente no início do século XX é que os governos identificaram que a doença que afetava esses trabalhadores era o câncer pulmonar (AFONSO, 2009). Em 1980 iniciou-se nos Estados Unidos uma preocupação que perdura até os dias de hoje, com o acúmulo do ^{222}Rn em locais fechados especialmente em residências, escolas e locais de trabalho. A partir de sua difusão, o gás tende a se acumular nesses locais (AFONSO, 2009). Até os dias de hoje foram feitos muitos estudos epidemiológicos sobre o câncer de pulmão em mineiros. Esses trabalhadores são constantemente expostos ao gás que está confinado no subsolo. Os estudos compreendem minas de ferro, ouro e principalmente de urânio. Muitos resultados demonstram o quão são consistentes esses estudos quanto a uma relação proporcional (linear) entre o excesso de risco e exposição acumulada (ICRP, 1994).

Por ser um emissor alfa, o ^{222}Rn não oferece riscos à saúde em irradiações externas ao corpo humano. Este tipo de partícula é facilmente blindado por uma folha de papel e até mesmo pela pele. O grande risco que emissores alfa oferece a saúde humana está em sua inalação. Uma vez incorporadas ao corpo, essas partículas passam a oferecer potenciais riscos à saúde pois, ao se estabilizar em algum órgão, elas irradiam grande quantidade de energia no mesmo. Segundo a ICRP (1994), vários estudos estabelecidos, além de qualquer razoável dúvida, mostram que a radiação

ionizante é um potencial agente carcinogênico em vários órgãos e tecidos do corpo humano, incluindo o pulmão, mas quantificar essa associação entre a radiação e incidência da doença ainda é difícil. Os estudos realizados em habitações e locais fechados foram iniciados a partir da década de 80 e esses buscam, desde então, uma correlação entre a probabilidade de se contrair câncer de pulmão e a exposição ao ^{222}Rn nesses tipos de ambiente. Infelizmente, os estudos para uma correlação geográfica são de difícil interpretação pela presença de muitas variáveis que causam confusão (ICRP, 1994).

As partículas alfas emitidas por esses radioisótopos são responsáveis pela alta transferência linear de energia (LET) para a matéria com que interagem (HENSHAW et al, 1990 apud FIELD 2007). Segundo Hall & Giaccia (2012), a LET é a energia transferida pela radiação ionizante, por unidade de comprimento, através do caminho percorrido por esta partícula na matéria em que ocorre a interação. Na tabela 6 são encontrados os valores de LET para variados tipos de radiação.

Tabela 6 - Energia linear transferida (LET).

VALORES TÍPICOS DE ENERGIA LINEAR TRANSFERIDA (LET)	
TIPO DE RADIAÇÃO	LET (KeV/ μm)
Cobalto-60 (radiação γ)	0,2
Raios-X (250 kV)	2,0
Prótons (10 MeV)	4,7
Prótons (150 MeV)	0,5
Partículas α (2,5 MeV)	166
Íons de Ferro (2 GeV) Radiação espacial	1,0

Fonte: adaptado de Hall & Giaccia (2012).

A alta LET fornecida pela radiação alfa pode provocar efeitos graves no DNA, como quebras em sua dupla fita que são de difícil reparação (CRAVEN & SMIT, 2006), embora as células dos mamíferos tenham desenvolvido vias especializadas para sentir, responder e reparar danos em suas bases (HALL & GIACCIA, 2012). Quando o organismo não consegue reparar os danos no DNA provocados pela radiação ionizante, as células geneticamente modificadas podem se reproduzir induzindo a formação de algum tipo de carcinogênese.

Diversos estudos demonstram os riscos à saúde oferecidos pela radiação alfa. Para Cothorn (1989), entre 4.000 e 30.000 casos fatais de câncer no pulmão ocorrem a cada ano nos Estados Unidos pela exposição ao gás ^{222}Rn em locais confinados, enquanto a USEPA (1993) projeta cerca de 14.000 mortes por ano naquele país pela exposição residencial ao gás. A agência admite que este número pode estar entre 7.000 e 30.000 mortes. Embora se reconheça que exista uma incerteza quanto a quantização desses riscos, a USEPA (1993) garante ser maior o risco de exposição ao ^{222}Rn se comparado a outros poluentes ambientais. Ainda conforme a USEPA (1993), das doenças relacionadas ao pulmão, apenas o tabagismo mata mais do que a exposição ao gás.

Não são todas as pessoas que respiram o gás ^{222}Rn e seus descendentes que têm maior probabilidade de desenvolver o câncer. O risco individual de se adquirir a doença está atrelado a três fatores: o nível de radônio, a duração da exposição e os hábitos do indivíduo em questão (se fumante ou não) (USEPA, 1993). Ainda de acordo com a USEPA (1993), o risco aumenta à medida que o indivíduo é exposto a níveis mais altos do gás durante um certo período de tempo. Fumar e ficar exposto ao ^{222}Rn é considerado um risco grave à saúde. Conforme apresenta a Tabela 7, é possível ver a relação dos riscos entre a exposição, taxa de concentração e condições dos indivíduos (fumante e não fumantes):

Tabela 7 - Riscos de exposição ao radônio.

RISCOS DE EXPOSIÇÃO AO RADÔNIO-222		
Análise comparativa a cada 1000 indivíduos, fumantes e não fumantes, expostos a diferentes níveis de exposição ao gás.		
CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO	FUMANTES	NÃO FUMANTES
740 Bq.m ⁻³	Cerca de 260 pessoas podem adquirir câncer de pulmão.	Cerca de 36 pessoas podem adquirir câncer de pulmão
370 Bq.m ⁻³	Cerca de 150 pessoas podem adquirir câncer de pulmão	Cerca de 18 pessoas podem adquirir câncer de pulmão
296 Bq.m ⁻³	Cerca de 120 pessoas podem adquirir câncer de pulmão	Cerca de 15 pessoas podem adquirir câncer de pulmão
148 Bq.m ⁻³	Cerca de 62 pessoas podem adquirir câncer de pulmão	Cerca de 7 pessoas podem adquirir câncer de pulmão
74 Bq.m ⁻³	Cerca de 32 pessoas podem adquirir câncer de pulmão	Cerca de 4 pessoas podem adquirir câncer de pulmão
48 Bq.m ⁻³	Cerca de 20 pessoas podem adquirir câncer de pulmão	Cerca de 2 pessoas podem adquirir câncer de pulmão

Fonte: adaptado de USEPA (2016).

A Tabela 7 apresenta dados sobre o risco de se estar exposto ao radônio com certa frequência e ser fumante. De acordo com a USEPA (2016), os dados para não fumantes devem ser analisados para indivíduos que nunca tenham fumado. Para ex-fumantes, as variantes se complicam e os dados ficam inconclusivos. Para a USEPA (2016), as probabilidades de se contrair um câncer de pulmão estão relacionadas com o quanto a pessoa fuma (quando fumante), a quantidade de ²²²Rn a que ela está exposta, se a pessoa já fumou e o quanto fumou. No entanto, a USEPA (2016) informa que, como nos casos de outros poluentes, existem incertezas sobre a magnitude dos riscos sobre a saúde causados pelo gás radioativo.

Não existem dados conclusivos sobre a relação entre exposição e idade dos indivíduos expostos (USEPA, 1993) mas, de acordo com Hall (2012), crianças e adolescentes são muito mais radio-sensíveis do que os adultos, especialmente em alguns órgãos específicos, como a tireoide.

3.3.5 Radônio em locais de trabalho

Para a IAEA (2003), o gás ^{222}Rn pode estar presente em uma gama de locais de trabalho como em minas de exploração mineral. Incluem-se nesta lista outros locais no subsolo como metrô, túneis, armazéns, cavernas turísticas e minas fechadas ao trabalho, mas abertas à turistas. Outros locais não subterrâneos podem ser afetados pelo gás como escolas, fábricas, lojas e escritórios (IAEA, 2003). A presença do gás em altos níveis de concentração nesses locais se deve à exalação por pressão deste através de rachaduras no chão. Esses edifícios estão normalmente em uma pressão inferior se comparados a seu entorno, consequência de a temperatura do ar no interior desses edifícios ser mais quente do que fora (IAEA, 2003).

Altos níveis de radônio foram encontrados em locais de trabalho subterrâneo de diversos países, como pode ser observado na Tabela 9 a seguir:

Tabela 8 – Concentração de ^{222}Rn no subsolo.

LOCAL DE TRABALHO	PAÍS	CONCENTRAÇÃO DO RADÔNIO (Bq.m^{-3})
Cavernas turísticas	Alemanha	400 – 11.180
Cavernas turísticas	Hungria	130 – 21.100
Cavernas turísticas	Eslovênia	20 – 10.000
Cavernas turísticas	Estados Unidos	48 – 1.850
Minas de visitação	Alemanha	400 – 20.280
Túneis	Finlândia	500 – 7.000
Trens subterrâneos (estações)	Finlândia	45 – 200

Fonte: adaptado de IAEA (2003).

É possível encontrar na literatura muitos registros de pesquisas sobre a concentração do ^{222}Rn realizadas em locais de trabalho que estão localizados no subsolo, principalmente em países da América do Norte e Europa. A preocupação com esses ambientes se deve ao longo período a que podem ser expostos os trabalhadores ao gás, a partir de sua presença no ambiente. Não é raro encontrar publicações sobre regulamentações feitas por estes países para a presença do ^{222}Rn , considerado por essas nações como um problema de saúde e contaminação pública. Utilizando

detectores SSNTD Makrofol em sua pesquisa, Font (2008) apresenta um estudo sobre a concentração do gás radioativo na Catalunha, Espanha. Na publicação, o autor demonstra regulamentações feitas por aquele país e pela União Europeia para o monitoramento do ^{222}Rn . Fonte (2008) realizou sua pesquisa em treze locais de trabalho, descrevendo esses como minas ativas, minas antigas, cavernas turísticas e estações subterrâneas de trem. Dos treze locais estudados, em dois foram encontrados níveis superiores aos recomendados pela ICRP ($1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Os dois locais com níveis superiores ao recomendado foram minas de exploração mineral no passado, que possuem alta umidade, ventilação baixa e natural. Os resultados obtidos por Font (2008) podem ser vistos conforme Tabela 9:

Tabela 9 - Quantificação de ^{222}Rn em locais de trabalho.

DESCRIÇÃO DOS LOCAIS DE TRABALHO NO SUB-SOLO			
Código do local	Pontos de amostragem	Concentração de ^{222}Rn ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)	Características do local
1	7	22	Mina Antiga. Hoje funciona um museu no local.
2	6	38	Mina ativa. Umidade relativa próxima de 60%.
3	7	11.600	Mina Antiga. Hoje funciona um museu no local.
4	6	12.900	Mina Antiga. Hoje possuem pesquisadores trabalhando no local.
5	8	134	Caverna turística. Umidade próxima a 90%.
6	5	78	Mina Antiga. Hoje funciona um museu no local.
7	2	58	Caverna turística. Umidade próxima a 90%.
8	2	197	Caverna turística. Umidade próxima a 90%.
9	4	<1-24	Mina Antiga. Hoje funciona um museu no local.
10	2	22	Mina ativa. Umidade relativa próxima de 60%.
11	5	<1	Mina Antiga. Hoje funciona um museu no local.
12	6	41	Mina ativa. Umidade relativa próxima de 60%.
13	16	5-84	Sete estações de trem. Dois estacionamentos públicos.

Fonte: adaptado de Fonte (2008).

Font (2008) utilizou tempos variados para a exposição dos detectores em sua pesquisa. Nos locais onde a concentração foi mais alta, os detectores ficaram expostos por um período de 5 a 7 dias. Nos demais os períodos variaram entre um e nove meses.

Um guia publicado pela agência responsável pela saúde pública da Inglaterra, a *Public Health England* – PHE (2016), demonstra, mais uma vez, a preocupação com o monitoramento do ^{222}Rn em locais confinados de trabalho. O guia traz informações básicas sobre o elemento radioativo, seus riscos e necessidade de mitigação, caso a concentração esteja acima do recomendado pela ICRP. Naquele país existe, assim como na Espanha, uma regulamentação específica para o problema. Além de locais de trabalho que estão no subsolo, o guia inglês ainda abrange a necessidade de controle sobre locais como indústrias, bancos, escolas e escritórios.

3.3.6 Radônio em cavernas e cavidades naturais

As cavidades subterrâneas naturais como grutas, cavernas e minas de exploração mineral ou desativadas oferecem as melhores condições possíveis para aglomeração do gás radioativo ^{222}Rn . Estas estruturas estão em locais profundos, possuem ventilação limitada e são constituídas por solo e rochas que abrigam radionuclídeos primários que, conseqüentemente, irão decair gerando filhos sólidos e desses o gás radioativo.

A incerteza quanto aos riscos a que estão expostos os espeleologistas, trabalhadores de minas de exploração mineral, cavidades subterrâneas e grutas turísticas pode ser percebido em muitos estudos até aqui publicados. Field (2007) chama a atenção para a falta de clareza para os riscos à saúde humana causados pela exposição a níveis elevados de ^{222}Rn , deixando sem informações consistentes esses exploradores e trabalhadores. Espeleologistas e guias turísticos geralmente são expostos a poucas horas mensais, o que torna as estimativas de riscos, até o que se sabe nos dias de hoje, insignificantes. Para trabalhadores de minas de extração mineral, que estão expostos a mais tempo no decorrer do mês e estão em contato com concentrações maiores do gás, o risco de exposição se eleva, podendo levá-los a desenvolver

doenças internas como o câncer de pulmão (FIELD, 2007).

Um outro estudo, publicado por Hedt & Boal (1998), analisou a concentração de ^{222}Rn em cavernas subterrâneas em Victoria, Austrália. Além da concentração, a pesquisa fez uma estimativa sobre a exposição dos guias turísticos à radioatividade natural. Em várias cavernas analisadas a concentração de radônio excedeu o nível de ação de 1.000 Bq.m^{-3} , recomendados por normas técnicas de agências internacionais e internas daquele país. Em um local pesquisado foi encontrada a concentração acima de 9.000 Bq.m^{-3} . Todas as cavidades analisadas na cidade de Buchan, que fica a 450 km de Melbourne, tiveram as concentrações avaliadas acima do nível de ação, estimando-se um range de exposição entre 5,1 e 8,9 mSv por ano para os guias daquelas cavidades (HEDT & BOAL, 1998). Embora a legislação local exija monitoramento sobre a radiação e consequentes planos de ação, isso não ocorria até a publicação de Hedt & Boal (1998), que após as análises quantitativas, propuseram um plano de ação para os trabalhadores daquelas cavernas. A variação sazonal da concentração ocorreu de forma mais acentuada nas estações mais frias, sendo que as concentrações se apresentaram maiores no verão (HEDT & BOAL, 1998). Ainda segundo os autores, a variação de concentração ocorreu em algumas cavidades, sendo que em outras ela se mostrou constante durante todas as estações do ano. Quando há variação, esta pode alcançar no verão o dobro de concentração mensurada em tempos frios. No estudo de Hedt & Boal (1998), a concentração possui variações de acordo com a localização na caverna, ao longo do dia, pela estação do ano e ano a ano, conforme pode ser visto na Tabela 10 abaixo:

Tabela 10 - Variação na concentração de radônio (Bq.m⁻³)

Local	Verão (1996)	Inverno (1997)	Verão (1997)
Eastern Chamber	8409 ± 423	2394 ± 200	-
Petrified Shower	3481 ± 457	2428 ± 177	-
King's Chamber	2944 ± 376	-	-
Ivory Place	4388 ± 737	2290 ± 197	6581 ± 466
Amber Bank	3696 ± 737	1834 ± 125	-
Blackwood Chb	3207 ± 769	1057 ± 156	-
Octopus Chamber	2238 ± 539	964 ± 190	6871 ± 343

Fonte: adaptado de Hedt & Boal (1998).

As medidas utilizadas para a construção da tabela adaptada acima foram feitas em intervalos de 24 horas com o uso da câmara de ionização AlphaGuard®.

3.3.7 Ações mitigadoras à concentração de radônio

Uma premissa básica de proteção contra a radiação, conforme descreve a IAEA (2003), é dividir as atividades entre práticas e intervenções. A prática é reconhecida como qualquer atividade humana que introduz fontes adicionais de exposição ou vias de exposição ou ainda, aumentar o número de pessoas expostas ou a probabilidade de exposição de pessoas no local. As intervenções são reconhecidas como qualquer ação destinada a reduzir ou evitar a exposição ou a probabilidade de exposição a fontes que não são controladas ou estão descontroladas por acidente (IAEA, 2003). Quando o radônio atinge níveis de concentração em que se precisa tomar medidas de intervenção, a esses níveis dá-se o nome de nível de ação. O nível de ação em locais de trabalho é dado, em uma concentração média anual, de 1000 Bq.m⁻³ para uma ocupação de 2000 horas por ano, o que equivale a uma dose eficaz de cerca de 6 mSv. Para a IAEA (2003), os níveis de exposição em locais de trabalho, anteriormente mencionados, não demarcam níveis de exposição segura e/ou inseguras.

As concentrações do gás em um edifício variam com o tempo, tanto diurnamente quanto sazonalmente. Essas mudanças são devidas tanto aos níveis de radônio no subsolo quanto às mudanças relacionadas a ventilação no interior dos locais

analisados. Conseqüentemente, medições de longo prazo são tidas como mais recomendadas do que medidas de curto prazo (IAEA, 2003). Se as concentrações encontradas forem inferiores às concentrações indicadas para níveis de ação, nenhuma medida deverá ser necessária, mas recomenda-se ao órgão regulador que sejam estipulados novos períodos para análise da concentração do gás. Se no local analisado os níveis encontrados forem de ação ou acima desses, medidas corretivas precisam ser tomadas para que sejam reduzidos esses níveis (IAEA, 2003). As medidas tomadas não podem ser apenas paliativas, tendo que reduzir os níveis abaixo daqueles indicados às medidas de ação. O local deverá ser monitorado para que se garanta a funcionalidade das medidas corretivas e se ainda assim o local apresentar medidas superiores, a este deverão ser aplicados esquemas específicos de radioproteção para garantir a saúde dos trabalhadores locais (IAEA, 2003).

Segundo a IAEA (2003), as ações mitigadoras a serem tomadas variam de acordo com os edifícios onde foram encontrados altos níveis do ^{222}Rn . Para fundações e porões próximos aos solos, a medida mais eficaz é a redução da pressão deste gás nas redondezas em relação a pressão da estrutura analisada. Se a estrutura não está em contato direto com o solo, é recomendada uma ação de ventilação mecanizada, reforçando a ventilação natural, onde a troca de ar com a parte externa sirva para reduzir os níveis de concentração do ^{222}Rn (IAEA, 2003). Na Tabela 11 é possível analisar a relação de custo e benefício destas práticas mitigadoras.

Tabela 11 - Métodos de mitigação.

MÉTODO	CUSTO	EFETIVIDADE
Despressurização do subsolo	Moderado	Alta
Ventilação do subsolo	Moderado/Baixo	Variável
Selagem do piso	Moderado	Moderada
Melhoria na ventilação	Moderado	Baixa
Remoção do subsolo	Alto	Alta
Tratamento da água	Moderado	Alta

Fonte: IAEA (2003).

O estudo de Ajayi (2018), demonstra que a ventilação mecânica é uma eficaz medida de controle do ^{222}Rn em ambientes de trabalho subterrâneos, mas que se apresenta como uma alternativa de difícil implementação e de baixa eficácia em minas de exploração mineral. As mudanças de porosidade e vazamentos de trabalhos antigos levam a diferentes respostas para os projetos de ventilação existentes. Em sua pesquisa, Ajayi (2018) sugere que a modificação da pressão no topo da caverna, mantendo-a negativa, associada a uma ventilação que aumente o fluxo de ar, diminui a concentração de ^{222}Rn na maioria das regiões desta cavidade, porém poderão ocorrer acúmulos do gás em algumas regiões devido à variação da pressão.

No estudo publicado por Hedt & Boal (1998), após a quantificação do gás radioativo em cavernas de exploração turística na Austrália, foi sugerido um plano de gerenciamento para proteção de guias turísticos expostos ao ^{222}Rn . O referido estudo pontua as dificuldades de se utilizar meios mitigadores à contaminação radioativa, uma vez que medidas de baixo custo e populares, como a ventilação forçada, iriam perturbar o ambiente destas cavidades, dada a sensibilidade dos espeleotemas ali existentes. O monitoramento utilizou câmaras de ionização AlphaGuard® e encontrou, em várias localidades, níveis muito superiores a 1.000 Bq.m^{-3} .

3.4 EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO

3.4.1 Exposição a partículas carregadas

A exposição é uma grandeza baseada na capacidade da radiação de produzir ionização no ar sob a temperatura e pressão ambiente. É a quantização indicada por muitos detectores de radiação como as câmaras de ionização. A unidade do sistema internacional (SI) para a exposição é o Coulomb por quilograma (C/kg) no ar, que substituiu uma antiga unidade, Roentgen (R). Um R equivale a $2,58 \times 10^{-4} \text{ C.kg}^{-1}$ de ar (IAEA, 2010). Conforme apresenta a IAEA (2010), a unidade de exposição é somente definida para o ar e não pode ser definida para descrever a dose em tecidos. Ainda assim, as câmaras de ionização são amplamente utilizadas para calibrar dispositivos de radiação médica e de conversão. Os fatores para calcular a dose absorvida foram cuidadosamente documentados para diferentes energias de radiação e tecidos.

3.4.2 Exposição única, fracionada ou periódica

De acordo com Tahuata (2013), a exposição do homem ou parte dos seus tecidos à radiação podem ter resultados bastante diferenciados. Ela pode ocorrer de uma única vez, de forma fracionada ou periodicamente. As exposições únicas ocorrem em exames radiológicos como nas tomografias (TAHUATA, 2013). Exposições fracionadas ocorrem, por exemplo, em tratamentos radioterápicos e as exposições periódicas podem ocorrer em rotinas de trabalho, como em instalações nucleares e no trabalho com materiais radioativos (TAHUATA, 2013).

Para uma mesma quantidade de radiação, os efeitos biológicos podem ser muito diferentes. Uma dose única aplicada a um paciente em tratamento de câncer, ao invés de fracionada, teria alta probabilidade de matá-lo (TAHUATA, 2013). Para Tahuata (2013), a exposição contínua que o homem sofre da radiação cósmica produz efeitos de difícil identificação. O mesmo não aconteceria se essa dose acumulada por um indivíduo por 50 anos fosse concentrada numa única dose. A exposição à radiação pode ser caracterizada ainda como de corpo inteiro, parcial ou colimada, onde o feixe é direcionado com grande precisão e exatidão. (TAHUATA, 2013).

3.5 GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS E UNIDADES

As grandezas dosimétricas são necessárias pois elas consideram as interações entre a radiação e a matéria, causando algum efeito ou subproduto (TAHUATA, 2013). Elas se diferem das grandezas radiológicas justamente por associar a quantidade de radiação a que um material foi submetido ou que o mesmo absorveu.

O equivalente de dose é mais uma grandeza dosimétrica. Ela foi traduzida erroneamente do inglês “*Dose Equivalent*” para dose equivalente nas normas brasileiras, mas esse trabalho a contemplará da forma correta. Seu conceito é a equivalência entre doses de diferentes radiações para produzir o mesmo efeito biológico. A equação é dada por:

$$H = D \cdot Q$$

A unidade do equivalente de dose (H) é o $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ou sievert. O fator (Q) é adimensional e é uma simplificação dos valores da Efetividade Biológica Relativa (*Relative Biological Effectiveness*, RBE). Os valores do fator de qualidade efetivo (Q) para os diversos tipos de radiação estão na ICRP 26, e podem ser vistos na Tabela 12:

Tabela 12 - Tipos de radiação e fator de qualidade RBE (Q).

TIPOS DE RADIAÇÃO	Q
Raios-X, Radiação Y e elétrons	1
Prótons e partículas em uma unidade de carga, massa de repouso maior que uma unidade de massa atômica e de energia desconhecida	10
Nêutrons com energia desconhecida	20
Radiação α e demais partículas com carga superior a uma unidade de carga	20

Fonte: ICRP 26 (1977).

A dose efetiva causada pela exposição ao ^{222}Rn e seus produtos de decaimento é calculada por meio da equação (PAPACHRISTODOULOU *et al.*, 2004, AYTEKIN *et al.*, 2006, SOMLAI *et al.*, 2009, KÁVÁSI *et al.*, 2010, LANGRIDGE *et al.*, 2010 apud ALBERIGI, 2011):

$$E = CRn \cdot F \cdot t \cdot d \cdot u$$

onde:

E = dose efetiva devida à inalação do ^{222}Rn na caverna (mSv/a).

CRn = concentração média de ^{222}Rn no ar (Bq/m^3).

F = fator de equilíbrio entre ^{222}Rn e seus filhos.

t = tempo gasto anualmente dentro da caverna.

d = fator de conversão de dose (= $1,4 \text{ mSv/mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$).

u = fator de conversão de unidade (= $5,6 \times 10^{-6} \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-3} / \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$).

3.6 DETECTORES DE RADIAÇÃO

A detecção da radiação ionizante não ocorre de forma direta. A radiação ionizante não é acessível a nenhum sentido humano, fazendo com que o processo de detecção seja feito de forma indireta. Essas interações indiretas possuem um contexto histórico, datada no final do século XIX, quando *Roentgen* estudava os raios catódicos em ampolas de *Crookes* e observou uma luminescência que era produzida por uma folha de papel coberta por platinocianeto de bário, cada vez que a ampola era submetida a altas tensões. O resultado desses experimentos levou ao descobrimento dos raios-X. Aramburu & Bisbal (1994) informa que um dispositivo de detecção verdadeiramente útil deve fazer mais do que simplesmente atestar a presença da radiação. Ele deve fornecer, por exemplo, informações quantitativas como intensidade, energia ou dose. Todos os detectores cumprem esses requisitos e, para isso, são determinados alguns parâmetros como eficiência, resolução e tempo morto de detecção que permitam determinar sua capacidade quantitativa (ARAMBURU & BISBAL, 1994). Quando se fala em eficiência de detecção, busca-se saber o quanto da radiação emitida por determinada fonte pode ser aferida em um detector. São utilizados fatores como, por exemplo, geométricos para quantificar a energia emitida pelas fontes de emissão de radiação ionizante, uma vez que as emissões são feitas por igual em todas as direções desta fonte (ARAMBURU & BISBAL, 1994). Para Tahuata (2013), para que um dispositivo seja classificado como um detector ele deve apresentar, durante a medição, algumas características como a repetitividade, demonstrando concordância entre os dados obtidos, reprodutibilidade dos dados frente a diferentes condições de medições, estabilidade do equipamento em conservar suas características durante ao longo do tempo, exatidão nos valores obtidos com os valores que servem como referência, precisão nos resultados respeitando o desvio padrão em relação à média, sensibilidade entre a resposta do instrumento e a correspondente variação do estímulo e eficiência na capacidade de converter em sinais de medição os estímulos recebidos.

De acordo com Knoll (1999), a introdução sobre os estudos dos detectores deve ser feita a partir da distinção entre os modos de operação existentes, com destaque para a geração de pulsos. Na geração de pulsos como modo de operação, os instrumentos

de medidas são designados para registrar cada quantia de radiação que interage com o detector (KNOLL, 1999). Ainda segundo Knoll (1999), em medidas de radiação dosimétricas utilizam o chamado *Current mode*.

Para Tahuata (2013), a definição de qual método será utilizado na medição está diretamente ligada ao tipo de radiação a ser analisada. A interação entre radiação e o meio é determinante para que a primeira seja mensurada. Os detectores de radiação utilizam meios diversos como emulsões fotográficas, meios termo luminescentes, detectores a gás, cintilação, materiais semicondutores entre outros (TAHUATA, 2013).

3.7 DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE RADÔNIO

Segundo a IAEA (2003), existem muitas técnicas aplicáveis para se detectar e mensurar o ^{222}Rn e suas progênes. Os descendentes do radônio são os principais responsáveis pela exposição do trato respiratório, mas é o elemento-pai quem governa a concentração no ar de sua progênie Para a IAEA (2003), a concentração do radônio, por ser variável de acordo com o tempo, deve ser tomada em períodos tão longos quanto possíveis, embora existam técnicas para a determinação da concentração média em períodos curtos, com dispositivos capazes de captar concentrações em períodos compreendidos de segundos a um ano ou mais. Ainda segundo a IAEA (2003), para medições em períodos entre três meses a um ano, detectores passivos podem ser utilizados com facilidade e precisão.

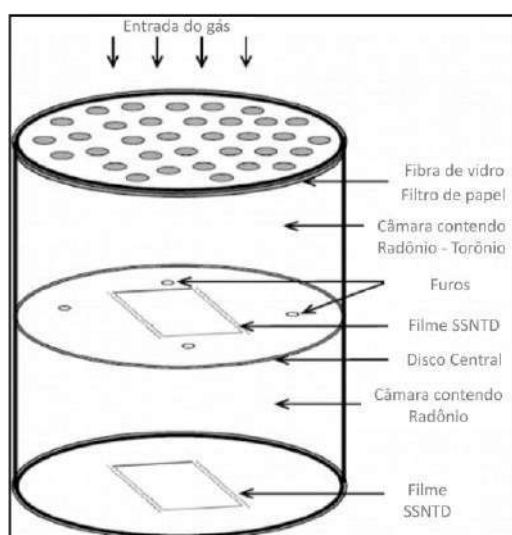
A medição da radiação α emitida pelo radônio pode ser tomada de forma passiva ou de forma ativa. Os instrumentos ativos são aqueles que demandam energia durante a operação, normalmente utilizados para analisar a influência do tempo na concentração do gás. Esses instrumentos ativos operam nos princípios das câmaras de ionização e célula de cintilação (SANTOS, 2010). Instrumentos passivos são aqueles que não demandam emissão de energia durante a operação, e são utilizados para avaliar a concentração média de radônio em prazos curtos e longos, no período de poucos dias a um ano. São detectores passivos comuns os detectores de traços (*Alpha-track detector*), as emulsões fotográficas e as câmaras de ionização de eletretos (SANTOS, 2010).

As análises feitas em ambientes externos como solos, grutas e cavernas demandam praticidade por não oferecerem condições acessíveis como o uso da eletricidade. Desta forma, os detectores passivos são os mais recomendados para este tipo de análise, uma vez que não exigem o fornecimento de energia para seu funcionamento, assim como ocorre nos detectores ativos.

3.7.1 Detectores sólidos de traços (SSNTD)

Os detectores sólidos de traços (tracks) consistem em filmes de materiais dielétricos, suportados em câmaras poliméricas que são utilizados na detecção e quantificação da radiação ionizante. O princípio de funcionamento deste tipo de detector é muito simples. Segundo Knoll (1999), quando a partícula carregada passa por um material dielétrico, a transferência de energia das partículas para os elétrons do material resulta em trilhas ou rastros de moléculas danificadas ao longo do material atingido (em uma escala atômica). Um esquema que demonstra o interior dos detectores SSNTD pode ser visto na Figura 5:

Figura 5 - Esquema do funcionamento de um detector SSNTD.



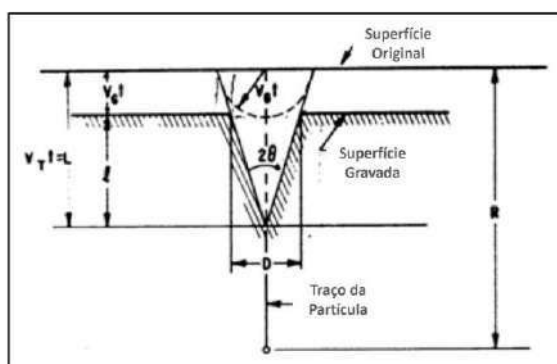
Fonte: adaptado de Prakash V. (2015).

Na revelação dos tracks, os filmes expostos ao radônio recebem um banho com fortes soluções de ácidos ou bases que atacam toda a superfície. As regiões modificadas pela exposição à radiação ionizante sofrem um ataque dez vezes mais rápido (KNOLL,

1999). Ainda de acordo com Knoll (1999), os danos no material dielétrico, em forma de *pits* (cavidades), têm tamanho suficiente para serem vistos em microscópios convencionais. A geometria desses *pits* pode ser observada conforme figura 6.

A densidade superficial de traços e a medida do diâmetro são os parâmetros relacionados com a energia da partícula alfa incidente nos detectores de traços nucleares de estado sólido (SSNTD) (DUPIM, 2017). Ainda de acordo com Dupim (2017), as medidas de densidade e diâmetro dos traços deixados no detector pelas partículas incidentes estão diretamente relacionadas com a atividade e dose de radioatividade. Um esquema com desenho apresentado na Figura 6 demonstra as deformações dos traços, provocadas pelas partículas α , na superfície dos filmes:

Figura 6 - Cavidades provocadas na superfície – SSNTD.



Fonte: adaptado de BANJANAC *et al*, 2006.

Assim como os demais detectores passivos, os detectores de traços possuem como vantagem a simplicidade de seu manuseio e o baixo custo de operação. As trilhas formadas variam para cada um dos vários tipos de material utilizados, que podem ser sólidos inorgânicos (cristais e vidros) e sólidos orgânicos (polímeros), sendo os mais populares a mica, os vidros de sílex e os filmes de policarbonato e poliéster (KNOLL, 1999).

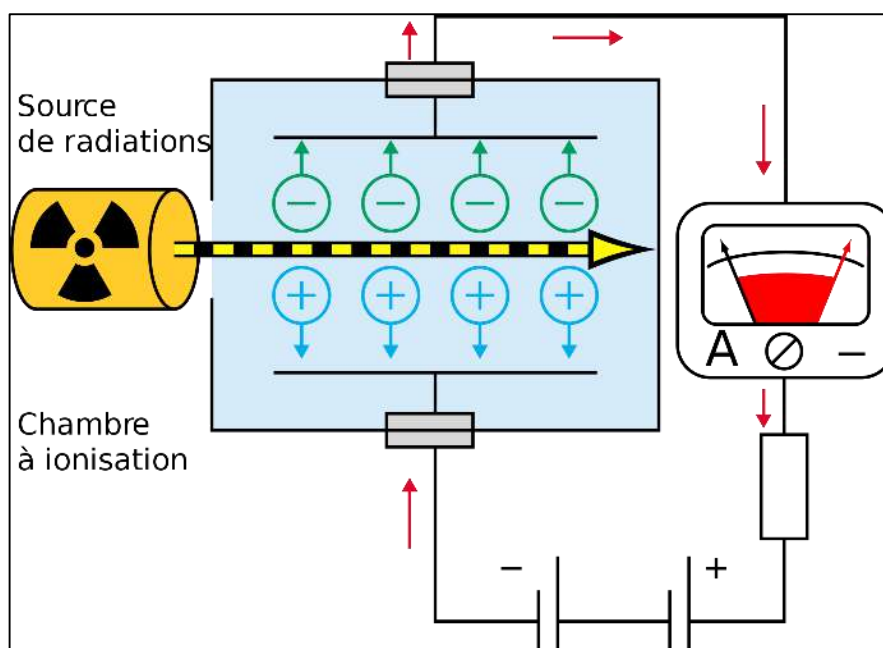
Dois tipos de detectores de traços são muito utilizados nas quantificações do ^{222}Rn . O Lexan é um detector passivo e dielétrico formado por uma resina de policarbonato. Um Lexan não irradiado é ópticamente transparente, com comprimentos de onda (λ) acima de 2750 angstroms (BENTON, 1969). De acordo com Benton (1969), com $\lambda =$

3000 angstroms a transmissão de luz é de 82%, podendo chegar a 91% para comprimentos de onda mais longos. Um segundo tipo de filme muito utilizado na detecção passiva de traços é chamado de CR-39. Este tipo de detector possui alta sensibilidade e uniformidade em sua resposta e, por este motivo, é requisitado em várias áreas das ciências e tecnologia. Segundo Fonseca (1983), o CR-39 é um plástico resultante da polimerização do monômero líquido Carbonato de Diglicol Alílico (Allyl Diglycol Carbonate), formando o plástico *Thermset*. Sua ótica é transparente, com estrutura amorfa formada por uma cadeia tridimensional *cross-linked* (FONSECA, 1983).

3.7.2 Câmaras de ionização

As câmaras de ionização são conhecidas como detectores de gás (ARAMBURU, 1994). São detectores constituídos por dois eletrodos condutores metálicos isolados eletricamente um do outro, enclausurados em um recinto juntamente com o gás em análise. Um esquema com o funcionamento das câmaras de ionização pode ser visto a seguir, na Figura 7:

Figura 7 - Princípio do funcionamento da câmara de ionização.



Para Knoll (1999), nas câmaras de ionização as partículas carregadas passam aceleradas através do gás no interior dessas, em um sistema de interação, criando moléculas excitadas e outras ionizadas ao longo do caminho. Após a ionização das moléculas antes neutras, os íons positivos resultantes e os elétrons livres formam os chamados par de íons, gerando o sinal elétrico necessário para ser mensurado.

3.7.3 Câmaras de ionização de eletretos

As câmaras de ionização de eletretos, ou simplesmente câmaras de eletretos são mais um método passivo conhecido e utilizado para monitoramento e mensuração do ^{222}Rn . Seu funcionamento simples e apuração rápida torna o método muito prático para aplicação em trabalhos de campo. A câmara de eletretos é um método integrado passivo usado extensivamente para mensurar a radiação natural (KOTRAPPA, 1999). Um eletreto é um disco rígido estável de teflon eletricamente carregado, aportado em uma câmara plástica condutora. Nestas câmaras os eletretos possuem duas funções específicas; são fonte de eletricidade e atuam como um sensor (KOTRAPPA, 1999).

Figura 8 - Câmaras de difusão com eletretos.

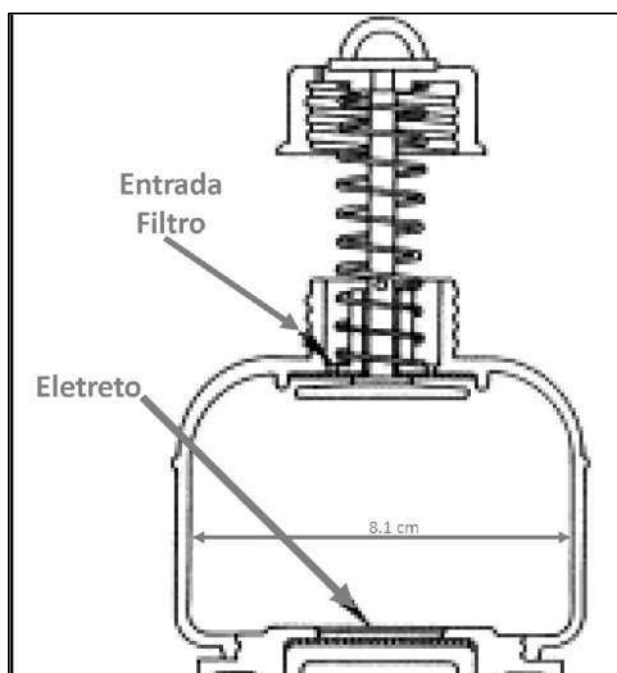


Fonte: o fabricante.

O princípio de funcionamento das câmaras de eletretos é muito simples. Conforme apresenta Santos (2015), o gás radioativo difunde para dentro das câmaras plásticas que suportam os eletretos passando por um filtro de entrada. Quando o ^{222}Rn e sua progênie ionizam o ar no interior da câmara plástica, as partículas alfas geradas ionizam o ar. Como no interior das câmaras há um campo elétrico estabelecido, os íons negativos são coletados pelo eletreto carregado positivamente, promovendo uma redução de sua carga inicial (SANTOS, 2009). Em campo, com o auxílio de um eletrômetro móvel, é possível analisar a carga anterior e posterior à exposição ao gás radônio destes eletretos. A diferença entre as cargas iniciais e finais juntamente com o tempo de exposição, a altimetria do local analisado e o background estabelecido forma o conjunto de dados necessários para determinação da exposição gerada pelo gás radioativo no local existente.

Existem dois tipos de eletretos. Os eletretos de curto prazo (*Short-term*) e os eletretos de longo prazo (*Long-term*). Os eletretos de curto prazo são utilizados em prazos máximos de 90 dias, enquanto os eletretos de longo prazo são utilizados em períodos superiores a 90 dias de exposição (KOTRAPPA, 1999).

Figura 9 - Esquema de uma câmara de eletretos.



Fonte: adaptado de JOBBÁGY *et al*, 2016.

Na Figura 9 foi apresentado um esquema de visualização interna de uma câmara de eletretos. Após aberta, a câmara permite a difusão do gás através do filtro. Uma vez ionizado o ar, o eletreto receberá os íons negativos, reduzindo sua carga inicial.

3.8 O MICROCLIMA EM AMBIENTES CAVERNÍCOLAS

Os estudos de sistemas atmosféricos subterrâneos iniciaram-se no Brasil a menos de 50 anos atrás, foram melhorando suas metodologias até a atualidade, com o aumento dos trabalhos de monitoramento com a finalidade de conservação ambiental, focados na necessidade de se conhecer a dinâmica da atmosfera subterrânea das cavernas brasileiras com base em estudos espeleoclimáticos (LOBO, 2010). Ainda de acordo com Lobo (2010), essas cavernas constituem-se de espaços subterrâneos confinados em rochas cuja espessura podem variar entre dezenas e centenas de metros, com um ou mais acessos à superfície. O ambiente cavernícola é um dos mais estáveis do planeta, pois seu envolvimento pelas rochas resguarda a atmosfera subterrânea da magnitude de variações climáticas do meio externo (LOBO, 2010). Conferido esse resguardo, a atmosfera subterrânea é caracterizada como um microclima de sistemas atmosféricos fechados (LOBO, 2010).

Os estudos da atmosfera subterrânea se justificam, dentre outros motivos, pela necessidade de compreensão dos mecanismos de interação atmosfera-rochas, de um modo a identificar a sua contribuição para a espeleogênese, para a corrosão e condensação (LOBO, 2010).

A atmosfera das cavernas é marcada por singularidades que as diferenciam dos demais sistemas atmosféricos naturais, em função de fatores como o confinamento especial, a ausência de luz e baixa incidência de luz solar direta. A atmosfera subterrânea apresenta processos físico-químicos de transferência e conservação de energia e massa semelhante aos encontrados em sistemas atmosféricos da superfície terrestre, com intensidades atenuadas na maioria dos casos (LOBO, 2010).

Considerando o acervo da SBE e banco de dados pesquisados, cerca de 30 trabalhos sobre essa atmosfera cavernícola são encontrados (LOBO, 2010). O estudo do

microclima dessas cavidades é importante para se compreender os fatores limitantes ao desenvolvimento e a distribuição espacial da vida em ambiente cavernícola, o desenvolvimento de espeleotemas e as alterações causadas pelo turismo (ROCHA, 2010). São considerados espeleotemas todas as formações rochosas no interior das cavernas, formadas pelo intemperismo local. A observação e encantamento visual por estes espeleotemas são os principais motivos da exploração turística dessas cavidades.

Em geral, as cavidades subterrâneas apresentam elevada umidade relativa do ar podendo atingir a saturação, com a temperatura tendendo a estabilidade na medida em que se adentra nas grutas. A concentração de gás carbônico é maior no interior das cavidades quando comparada com o meio externo (ROCHA, 2010). Ainda de acordo com Rocha (2010), grutas com grandes entradas e claraboias apresentam um microclima ainda regido pela dinâmica do ambiente externo, e cavernas com menores aberturas não são influenciadas pela atmosfera externa. A presença de rios, águas caudalosas e claraboias mostram-se os fatores mais determinantes para a variação do microclima no interior de cavernas do que a extensão da gruta, a amplitude dos salões e largura da boca, sendo que todas as grutas com rio de água corrente apresentam microclima variável (não estável), tornando a água um mecanismo importante de circulação em ambientes cavernícolas (ROCHA, 2010).

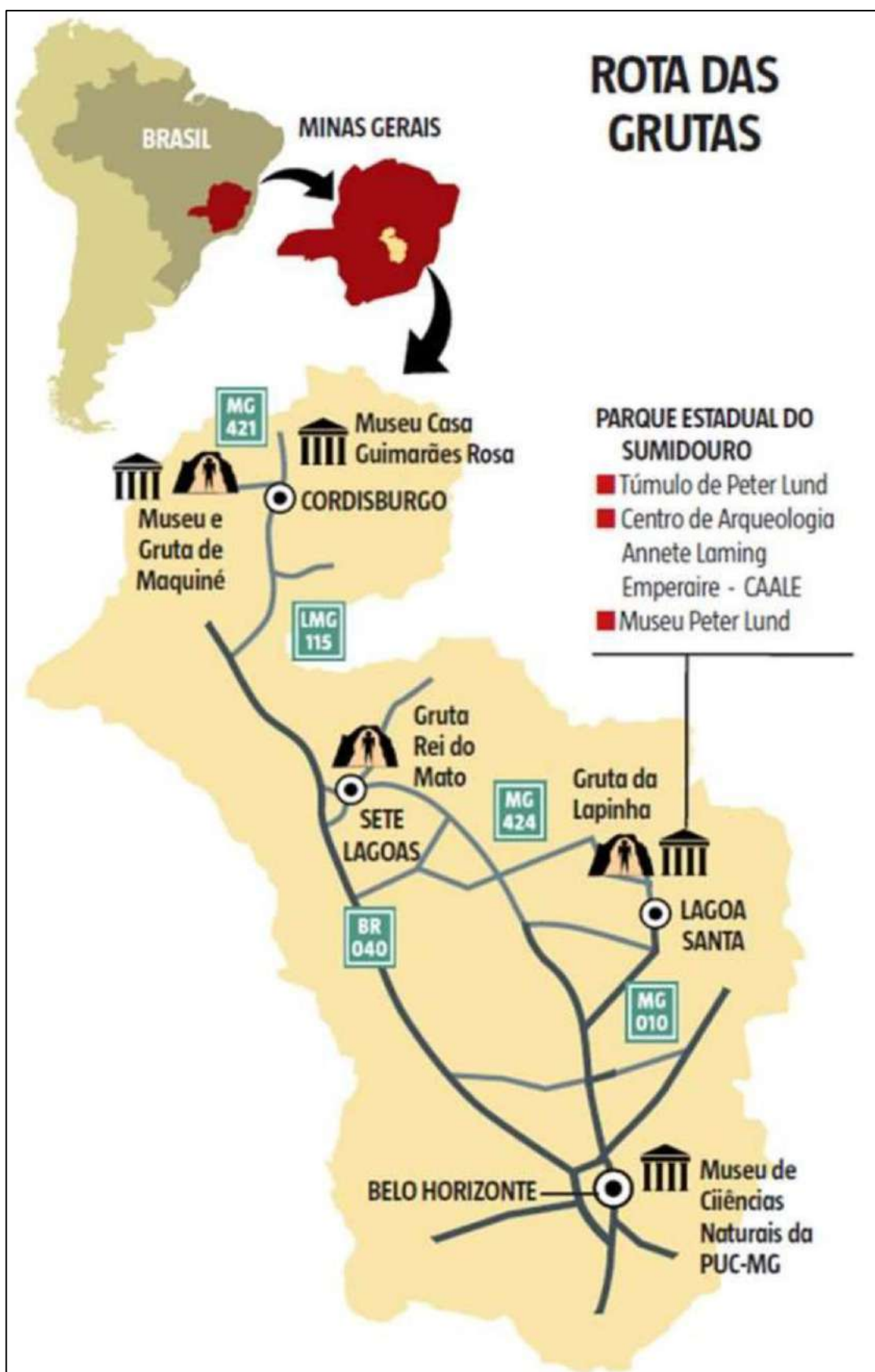
Em uma pesquisa que analisou os impactos ambientais e o planejamento turístico em áreas cársticas, Athayde (2001) faz duras críticas a modificações feitas no interior de grutas turísticas como, por exemplo, à iluminação artificial fixada no interior dessas cavidades. Para o autor, a presença de iluminação forçada e a escolha por lâmpadas incandescentes reduzem a umidade ao redor desses equipamentos, modificando as condições ideais do microclima local. Em Minas Gerais existem dois grandes exemplos dos impactos causados por esse tipo de iluminação. A gruta Rei do Mato e a Gruta de Maquiné, que desenvolvem vegetação não característica a ambientes cavernícolas e têm seus espeleotemas corroídos pelo uso deste tipo de iluminação (ATHAYDE, 2001). A escolha por luz quente se deve ao ganho visual que se tem quando utilizadas lâmpadas incandescentes, mesmo que o custo de manutenção destas seja superior.

Sabe-se que, preocupados com a degradação causada pelo tipo de iluminação citada por Athayde (2001), os órgãos estaduais e a administração das grutas citadas realizaram em 2018 a substituição das antigas lâmpadas incandescentes por novas lâmpadas brancas de LED, consideradas como lâmpadas frias. A partir deste ano, serão possíveis novos estudos para verificação se houve redução dos impactos com a implementação dessa nova prática.

3.9 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ROTA LUND

A rota das grutas Peter Lund é um projeto que visa fomentar o turismo e o desenvolvimento das regiões visitadas pelo naturalista dinamarquês no século XIX. As cidades visitadas pelo Dr. Peter Wilhelm Lund foram Belo Horizonte, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, Sete Lagoas e Cordisburgo, todas no estado de Minas Gerais. Como apresenta Barbosa (2014), o projeto vem sendo desenvolvido desde o ano de 2009 por órgãos governamentais e o principal objetivo, segundo os realizadores, é a conservação do meio ambiente e o desenvolvimento da economia por meio do turismo. Um dos maiores incentivadores e o primeiro idealizador do projeto foi o também paleontólogo Castor Cartelle que, assim como Lund, foi um dos principais especialistas mundiais sobre a fauna do pleistoceno. Com base nos trabalhos destas duas figuras icônicas é que foi traçada a Rota das grutas Peter Lund. Abaixo é possível, através da figura 10, analisar as estruturas envolvidas em um mapa da região turística:

Figura 10 - Mapa da Rota de grutas Peter Lund.



Fonte: Jornal Estado de Minas, apud Barbosa (2014).

A região metropolitana de BH é formada pela união de 105 municípios agrupados em oito microrregiões. A paisagem geomorfológica da região é resultante da dinâmica de diversos processos morfogênicos atuando diretamente sobre um conjunto de litologias com variada diferenciação composicional e características estruturais também diferenciadas. Na região de Belo Horizonte existe uma área geomorfológicamente arrasada, com morros ondulados ortognaisses, migmatitos e granitoides (CPRM-BH, 2009).

A configuração geomorfológica da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) pode ser estabelecida por uma divisão prática de cinco domínios minerários ou metalogenéticos, quais sejam a do grupo Nova Lima (aurífero), o do grupo Itabira (ferrífero), o do grupo Bambuí (calcários), as aluviões (areias, argilas e cascalhos) e o domínio dos granitoides, constituídos de granitos, gnaisses e migmatitos (OLIVEIRA, *et al* 1992). Ainda de acordo com Oliveira *et al* (1992), os calcários estão localizados na porção norte e noroeste, nas cidades de Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

Em Sete Lagoas, Pedro Leopoldo e Lagoa Santa há um domínio correspondente de rochas carbonáticas, onde se caracteriza o relevo cárstico. O relevo cárstico foi originado de exposições subaéreas dessas rochas principalmente devido aos densos fraturamentos. Neste domínio formam-se estruturas tais como sumidouros, dolinas, vales cegos, relevos ruiformes, lapiás, galerias e grutas (CPRM-BH, 2009).

Carste é uma palavra que advém de uma região Eslovena de nome “Krs”. O neologismo foi apresentado como *Karst* para as línguas inglesa e alemã e *Carste* no português brasileiro. As características das regiões cársticas são parecidas com a região que deu nome à formação do relevo. De acordo com Jones, *et al* (2003), Krs significa paisagem nua, pedregosa e sem água. É um tipo de paisagem onde o intemperismo químico, através da dissolução da rocha encaixante, determina as formas de relevo (JONES, *et al*, 2003).

As grutas da Rota Lund possuem em comum uma formação pautada na atuação do movimento de águas sobre rochas calcárias nos tempos primórdios. A composição sedimentar do calcário permitiu, no longínquo passado, a ação das águas e formação

dessas grutas ou cavernas. Em Lagoa Santa, segundo Berbert-Born (2000), está uma das mais importantes regiões brasileiras em termos de paisagem cárstica carbonática e da história das ciências naturais no Brasil. Estas características geomorfológicas se estendem para as demais grutas da Rota Lund.

3.10 A ESPELEOLOGIA E O ESPELEOTURISMO

O significado da palavra espeleologia, obtido através dos mais diversos dicionários da língua portuguesa, remete ao estudo da formação e constituição de grutas ou cavernas naturais, o que é um tanto quanto reduzido dada a amplitude alcançada por essa ciência (AGUIAR, *et al* 2017). A espeleologia é um campo de estudo relativamente novo no Brasil. De acordo com Aguiar, *et al* (2017), a espeleologia possui quase um século de existência no país, tendo como referência a criação da primeira entidade dedicada ao assunto, a entidade Sociedade Excursionista Espeleológica (SEE), criada em 1937 na Escola de Minas de Ouro Preto-MG. Se considerarmos os estudos de Dr. Lund, este período passa a ser superior a um século.

É um ramo que possui a interdisciplinaridade como fator intrínseco da ciência, por acampar diversas áreas de atuação. Esta abordagem multidisciplinar é fundamental para o seu desenvolvimento, possibilitando ramificações nas áreas de estudo e atuação do espeleólogo, despertando interesse em profissionais de diversas áreas (AGUIAR, *et al* 2017).

As cavernas sempre causam sensações diferenciadas, variando entre medo, curiosidade e deslumbramento. Isso porque é um ambiente diferente do cotidiano e que, de certa maneira, remete aos costumes da Humanidade de outrora (TIBIRIÇA, 2013). É um campo de alto potencial de exploração turística, mas que requer cuidados especiais por tratar, muitas vezes, de formações muito sensíveis e que não devem ser degradadas, sobre pena de se apagar traços antropológicos de suma importância para a atualidade e gerações futuras (TIBIRIÇA, 2013).

São considerados três tipos de riscos nos ambientes cavernícolas: os riscos de atividades espeleológicas científicas, turísticas monitoradas e os riscos da

curiosidade. No primeiro caso, os praticantes têm conhecimento da fragilidade do ambiente e estão preparados para o resgate no caso de ocorrerem eventuais acidentes e no segundo aspecto, os curiosos aventuram-se despreparados pelas cavernas e, por ignorarem os perigos, expõem-se a riscos por vezes fatais (TIBIRIÇA, 2013).

No Brasil, observa-se que apenas cerca de 3 dezenas de cavernas contam com infraestrutura para visitação turística intensiva e pouco mais de 10 com iluminação elétrica fixa (FIGUEIREDO, 2015). Esse número aumenta consideravelmente quando incluímos todas as cavernas cadastradas como turísticas, mesmo que sem estrutura para recepção de visitantes, espalhadas por parques e monumentos de conservação no Brasil. Ainda de acordo com Figueiredo (2015), cerca de 150 cavernas eram exploradas para o turismo no país naquele ano. Neste caso, o turismo rústico, onde a exploração é feita com auxílio de iluminação móvel e agentes locais, não fornece dados consistentes da frequência de visitação nessas cavidades, o que não ocorre com as grutas que possuem estrutura de recepção para visitantes.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

Os materiais e métodos utilizados por este estudo seguem os padrões dos órgãos internacionais como a ICRP, e respeitam os limites ambientes exigidos pelos órgãos competentes como o IEF-MG.

4.1 ÁREA DELIMITADA PARA ESTUDO

As três grutas selecionadas para este trabalho fazem parte do circuito de Grutas Rota Peter Lund. As grutas Rei do Mato, Maquiné e Lapinha são as mais famosas e com plano de manejo (que permitem visitação turística) e ficam próximas à região metropolitana de Belo Horizonte. O alto número de visitantes nas grutas da rota Lund demonstra que essas são um dos principais programas com potenciais ecoturísticos do estado.

A gruta Rei do Mato está localizada na cidade de Sete Lagoas – MG a 62 km de Belo Horizonte. Parte do Monumento Natural Estadual Rei do Mato, uma unidade de conservação e proteção integral que tem como intuito a proteção do sítio arqueológico e seus ecossistemas. Com formação de relevo cárstico em um imponente maciço calcário, possui composições espeleológicas atrativas e raras em seu interior (IEF, 2012). Sua extensão é de 998 metros, sendo 220 metros de extensão visitáveis e 40 metros de profundidade do nível da sua entrada, com passarela e guarda-corpo que garantem a segurança dos visitantes (IEF, 2012). As figuras 11, 12 e 13 correspondem, respectivamente, ao interior, a entrada (boca) e espeleotemas da gruta Rei do Mato.

Figura 11 - Gruta Rei do Mato.



Figura 12 - Entrada da gruta Rei do Mato.



Figura 13 - Espeleotemas - Gruta Rei do Mato.



Em Cordisburgo, cidade mineira que fica a 115 km de Belo Horizonte encontra-se a Gruta de Maquiné. Essa cavidade, descoberta em 1825, faz parte do Monumento Natural Estadual Peter Lund sendo bastante conhecida no cenário nacional recebendo, por exemplo, produções televisivas amplamente divulgadas pela grande mídia. No ano de 2017, conforme dados internos do Monumento Natural, a gruta recebeu mais de 44.000 visitantes. É de formação predominante calcária e sua extensão linear é de aproximadamente 650 metros do primeiro ao sétimo salão, cada um desses com uma riqueza científica que impressiona (IEF, 2012). A profundidade desta gruta em relação a sua entrada é de 18 metros. Os salões de número três e sete são os mais extensos, tanto na largura quanto em sua altura e encantam com a quantidade de espeleotemas dispostos aos visitantes (IEF, 2012). As fotos nas Figuras 14, 15 e 16 a seguir correspondem ao interior da gruta de Maquiné que contempla belas formações através do intemperismo sofrido.

Figura 14 - Gruta de Maquiné.



Figura 15 - Espeleotemas – Gruta de Maquiné.



Figura 16 – Espeleotemas – Gruta de Maquiné.



A Gruta da Lapinha está a 37 km de Belo Horizonte, localizada no município de Lagoa Santa. Importante para o Parque Estadual do Sumidouro, a cavidade faz parte de uma região de relevo predominante cárstico com formação maciça calcária. Possui cerca de 600 metros de extensão com galerias meandantes paragenéticas com belas anastomoses no teto (IEF, 2010). Assim como as demais grutas desta pesquisa, possui um acervo interno rico em espeleotemas com tites, mites, cortinas, travertinos e escorrimentos (IEF, 2010). A Lapinha possui, dentre outras características, a peculiaridade de ter tido um rio passando em seu interior, deixando as suas marcas pelas paredes.

Figura 17 - Gruta da Lapinha.



Dados do IEF-MG (2018) mostram que em 2017 cerca de 88.000 visitantes estiveram nas grutas do chamado circuito Peter Lund, um número que já chegou a 127.000 no ano de 2014, demonstrando todo potencial turístico dessas grutas. As grutas da rota Lund empregam cerca de 70 funcionários, sendo que aproximadamente 30 desses são guias que penetram todos os dias nas grutas acompanhado grupos de turistas. De acordo com a administração da gruta Rei do Mato, é raro de ocorrerem mais de duas descidas diárias à gruta por um mesmo guia turístico.

Figura 18 - Gruta da Lapinha.

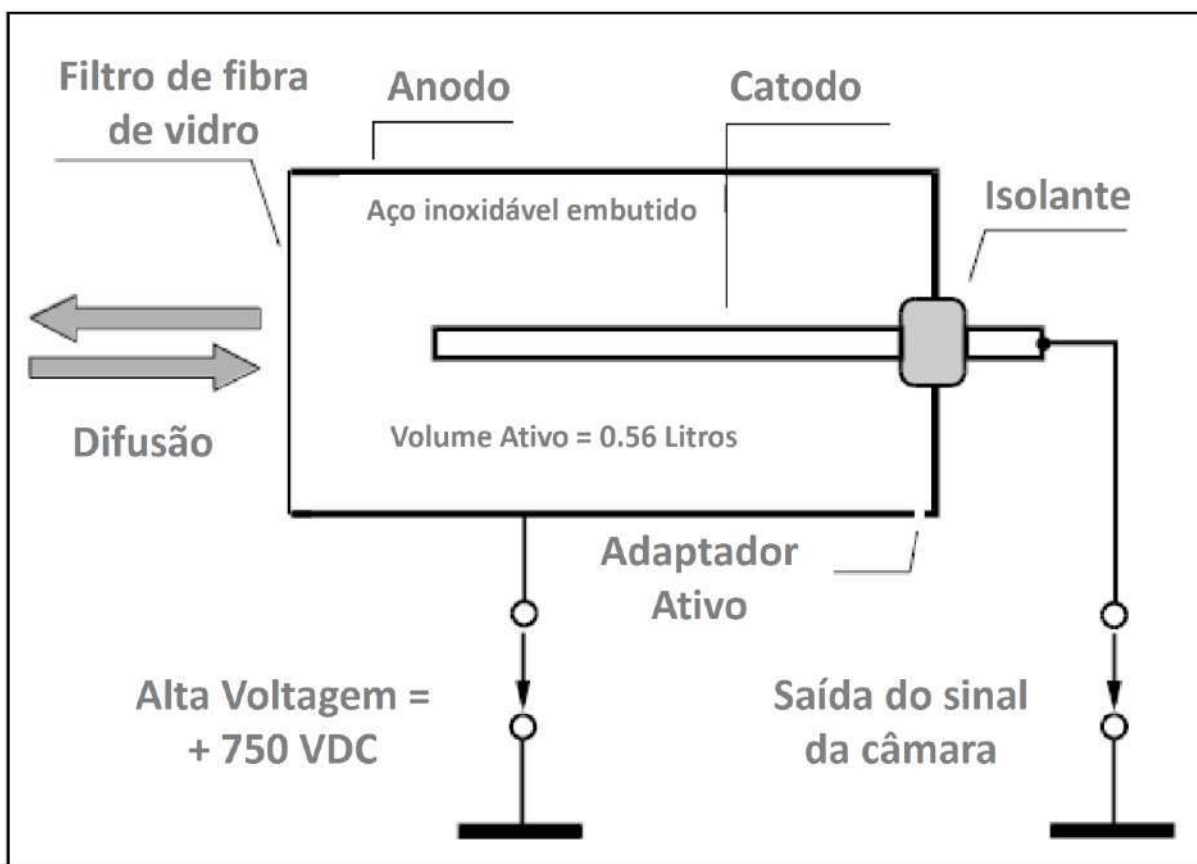


4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 Análise com AlphaGuard® - Detecção ativa

Para a análise quantitativa preliminar e de curto prazo foi utilizado uma câmara de ionização ativa modelo *AlphaGuard®* da empresa alemã *Saphymo GmbH*. O detector, de acordo com o fabricante, possui alta sensibilidade, calibração garantida por cinco anos e não é sensível quanto a possíveis altas umidades no ar. Seu funcionamento baseia-se na difusão do gás através de fibras de vidro na câmara de ionização. As fibras de vidro permitem que apenas o ^{222}Rn entre na câmara, retendo impurezas e poeira e toda sua progênie. Abaixo, na Figura 19, é possível ver o esquema de leitura do AlphaGuard®:

Figura 19 - Funcionamento do AlphaGuard.

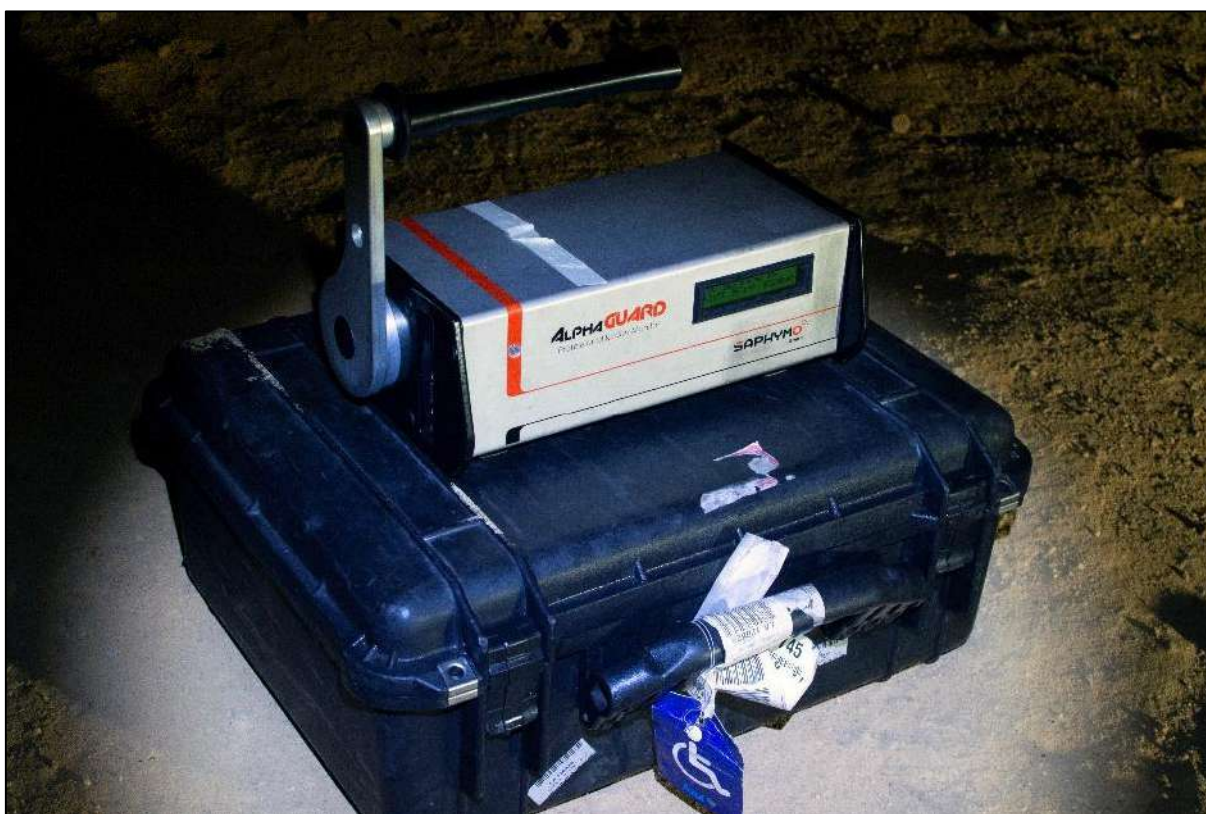


Fonte: adaptado do Manual do usuário - AlphaGuard®.

De acordo com o manual do usuário, a câmara de ionização cilíndrica interna do AlphaGuard® possui um volume interno de 0,56 L. Tem o interior metálico com um potencial de +750 V quando ligado. Na extensão longitudinal, o eletrodo central está conectado a um isolante com o sinal de entrada para pré-amplificação altamente sensível. Os sinais de medição trabalhados na unidade de pré-alimentação são transmitidos para uma rede eletrônica para processamento digital adicional.

O aparelho, para essa medida preliminar específica, ficou exposto em funcionamento nas grutas por duas horas e foi programado para trabalhar em ciclos de 10 minutos, com intervalos de dois minutos entre esses ciclos em modo de difusão (DIFF).

Figura 20 - AlphaGuard em funcionamento - Gruta Rei do Mato.



Na análise preliminar da concentração de radônio utilizando o AlphaGuard®, foram escolhidos os pontos mais profundos das grutas, desde que esse pudesse ser acessado sem oferecer riscos ao operador do equipamento, no último salão visitável das mesmas. Esta escolha foi feita diretamente pelas características físico-químicas

do radônio. Através de uma varredura de taxas de dose gama com um espectrômetro de aplicações geofísicas RS-230 BGO da fabricante *Radiation Solutions INC*, pode-se analisar o *background* (radiação de fundo presente no local). A partir dessa varredura, determinou-se o ponto onde foi deixado o equipamento para essa medida preliminar.

Na gruta Rei do Mato o AlphaGuard® foi colocado no último salão, o chamado “salão das raridades”. Este é o nível mais baixo visitável da gruta e nele não existem janelas ou aberturas visíveis. No mapa da figura 25 é possível ver a posição exata onde foi deixado o equipamento para as medidas preliminares.

Na gruta do Maquiné o AlphaGuard® foi colocado na sétima e última câmara visitável, que também não possui janelas ou aberturas visíveis. Esse salão, chamado de “salão Peter Lund”, de acordo com o plano de manejo do monumento natural, possui cerca de 42 metros de comprimento por 22 metros de largura, com a altura máxima chegando a 12 metros de altura se comparado à boca de entrada. No mapa da figura 26 foi apresentada a posição exata do equipamento durante a aferição.

O AlphaGuard® foi deixado no quarto salão da gruta da Lapinha. O salão é o mais amplo e considerado pelos guias de turismo locais o mais isolado ao meio externo. Conhecido como salão da Catedral, possui entre 15 e 20 metros de extensão.

Os resultados fornecidos pelo equipamento foram extraídos através de um *software* próprio, fornecido pelo fabricante, de nome *DataExpert*.

4.2.2 Análise com AlphaE® - Detecção ativa

Uma nova análise quantitativa de curto prazo foi feita utilizando o equipamento AlphaE® no momento da retirada dos detectores SSNTD das grutas. O equipamento, assim como o AlphaGuard® é produzido pela empresa alemã Saphymo GmbH. É um detector pequeno, leve e a proposta do fabricante é sua utilização para monitorar a exposição e dosimetria pessoal ao radônio em ambientes fechados como grutas e minas, fornecendo dados quantitativos em tempo real que podem ser gravados.

O AlphaE® possui uma câmara de difusão de diodo de silício protegida com uma membrana Gore-tex que permite apenas a passagem do gás ^{222}Rn pelos furos para o interior da câmara de difusão. A radiação α emitida pelo radionuclídeo é registrada pelo detector de silício que geram pulsos a serem amplificados, contados e convertidos a unidades de interesse que, em sequência, são armazenados. A apresentação externa do equipamento pode ser vista na figura 21 abaixo:

Figura 21 – Apresentação externa do AlphaE.



Fonte: Guia do usuário.

O AlphaE® foi exposto nos últimos e mais baixos salões visitáveis durante o período de aproximadamente 20 horas, com ciclos de contagem de 10 minutos, juntamente com o AlphaGuard® e câmaras de eletretos, nas grutas do Maquiné e da Lapinha. Os resultados fornecidos pelo equipamento foram extraídos através de um *software* próprio, fornecido pelo fabricante, de nome *DataExpert*.

4.2.3 Análise com os detectores SSNTD

Com a análise do *background*, feita a partir espectrômetro de aplicações geofísicas RS-230 BGO, determinou-se os demais pontos onde foram colocados os detectores SSNTD para serem irradiados em tempo não inferior a três meses. Tais detectores foram colocados em pares. Utilizou-se, para a formação dos pares, um detector com filme Lexan e o outro CR-39, suportados por câmaras plásticas com cerca de 5 cm de diâmetro, para que as medias fossem feitas em redundância. Os pares foram devidamente codificados para o controle na apuração dos resultados e divulgação desses. Cada detector SSNTD foi suportado em câmaras plásticas de difusão, que permitem a passagem apenas do ^{222}Rn a partir de um filtro em sua entrada, deixando os filhos e aerossóis fora da mensuração. Na figura 22 é possível ver os detectores SSNTD ainda sem utilização, e na figura 23 os detectores após serem expostos ao ^{222}Rn :

Figura 22 – Câmaras de difusão: Detectores SSNTD virgens.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura 23 - Detectores SSNTD em exposição ao ^{222}Rn .



Fonte: arquivo pessoal.

Os pares foram colocados ao longo das câmaras das grutas analisadas, desde a região próxima a entrada (boca) da gruta, onde há mais ventilação natural, quanto no último salão visitável das mesmas, onde a ventilação natural é mais limitada. Os arranjos com os pares foram fixados em espeleotemas ou estruturas metálicas existentes no local, em alturas variadas junto ao solo e sempre buscando os pontos mais baixos, conforme ilustra a figura 24 a seguir:

Figura 24 - Pares de SSNTD fixados em um espeleotema.



Fonte: arquivo pessoal.

As profundidades dos detectores nas grutas foram determinadas a partir da metodologia clássica para topografia de cavernas utilizada pela SBE, com a utilização de uma trena a laser, um clinômetro e uma mira, tendo como ponto zero de referência as bocas das cavidades. A gruta foi dividida em bases e entre essas bases foram aferidas a distância e inclinação com o auxílio de um tripé. As alturas ou profundidades foram determinadas a partir da relação trigonométrica abaixo:

$$\text{sen } \theta = \frac{\text{Cateto oposto}}{\text{hipotenusa}}$$

O ângulo θ foi aferido no clinômetro e a hipotenusa corresponde a distância impressa pela trena a laser. Com duas variáveis conhecidas, bastou encontrar a terceira, o cateto oposto, em uma conta matemática simples. Tabelas com todos os dados mensurados para determinação da profundidade podem ser vistas nos anexos I e II. Cada base foi referenciada como AXX, as radiais foram referenciadas como RXX e as bases em bifurcação foram referenciadas como BXX. Os resultados negativos de profundidade apresentados demonstram que os detectores estão abaixo do nível da base imediatamente anterior a ele. De forma inversa, os resultados positivos mostram que os detectores foram colocados acima do nível da base imediata anterior.

Na Tabela 13 a seguir são apresentadas as localidades onde foram colocados dos pares de detectores no interior da gruta Rei do Mato:

Tabela 13 - Detectores SSNTD fixados na gruta Rei do Mato.

PROFUNDIDADE DOS DETECTORES SSNTD NA GRUTA REI DO MATO			
CÓDIGO	TIPO DE FILME	LOCALIDADE	PROFUNDIDADE (m) (Em relação à Boca da caverna)
C12A	CR-39	Salão das Raridades (A)	-27,17
C02A	LEXAN	Salão das Raridades (A)	-27,17
C19B	CR-39	Salão das Raridades (B)	-25,93
C01B	LEXAN	Salão das Raridades (B)	-25,93
C15A	CR-39	Salão Principal (A)	-27,43
C03A	LEXAN	Salão Principal (A)	-27,43
C17B	CR-39	Salão Principal (B)	-23,47
C04B	LEXAN	Salão Principal (B)	-23,47
C18	CR-39	Salão Principal	-18,90
C05	LEXAN	Salão Principal	-18,90
C10	CR-39	Salão dos Blocos Desabados	-12,13
C06	LEXAN	Salão dos Blocos Desabados	-12,13
C09	CR-39	Salão da Couve-Flor	0,31
C07	LEXAN	Salão da Couve-Flor	0,31

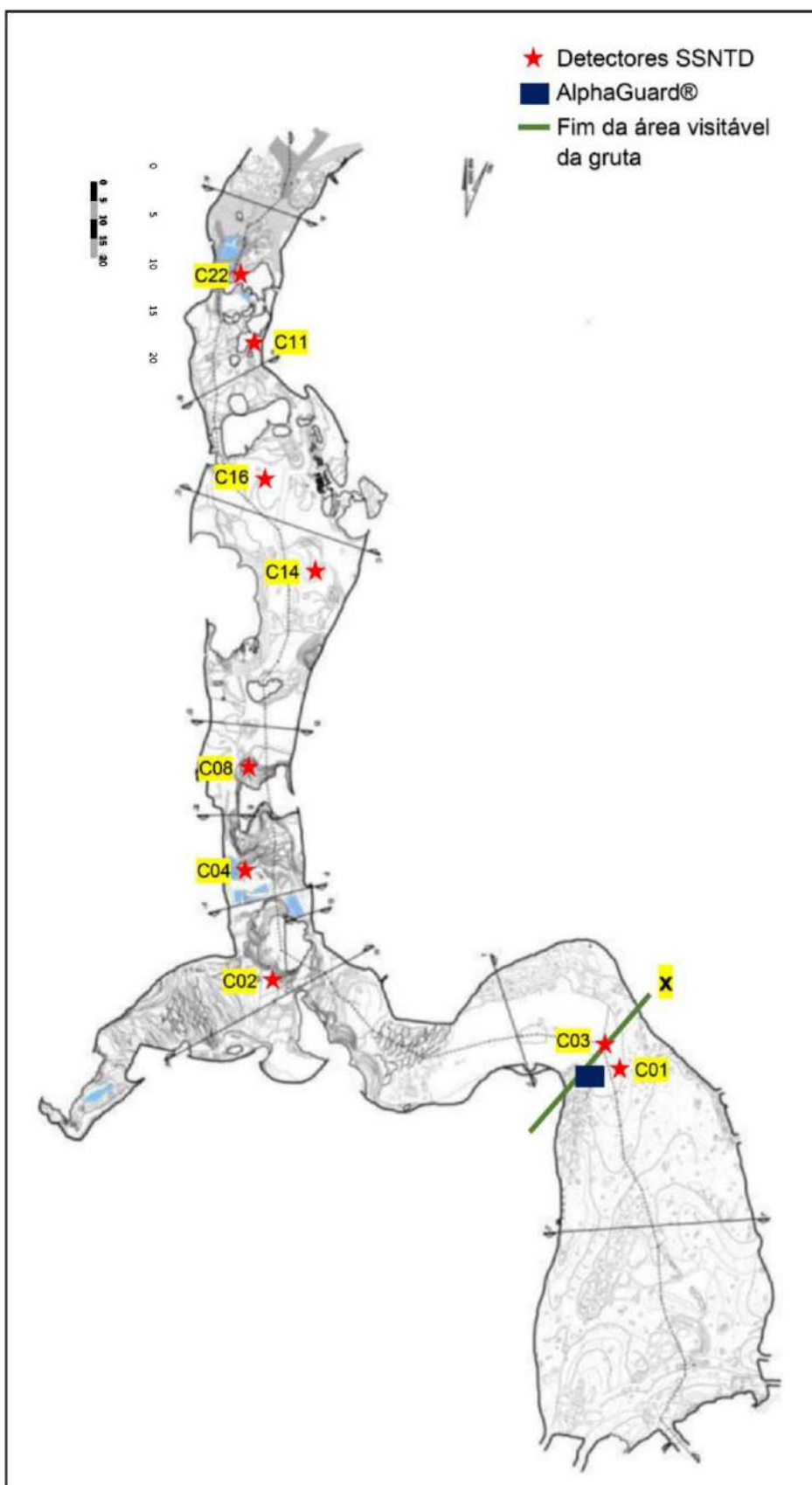
As posições de colocação dos detectores nas grutas pesquisadas podem ser vistas nos mapas das Figuras 25 e 26 a seguir:

Figura 25 - Posição dos detectores na gruta Rei do Mato.



Fonte: Plano de manejo do MNE Gruta Rei do Mato.

Figura 26 - Posição dos detectores na gruta de Maquiné.



Fonte: Plano de Manejo do MNE Peter Lund.

Tabela 14 - Detectores SSNTD fixados na gruta de Maquiné.

PROFUNDIDADE DOS DETECTORES SSNTD NA GRUTA DE MAQUINÉ			
CÓDIGO	TIPO DE SSNTD	LOCALIDADE	PROFUNDIDADE (m) (Em relação à Boca da caverna)
C01A	CR-39	Salão Peter Lund (A)	-10,16
C01A	LEXAN	Salão Peter Lund (A)	-10,16
C03B	CR-39	Salão Peter Lund (B)	-12,55
C02	CR-39	Salão das Fadas	-4,55
C02	LEXAN	Salão das Fadas	-4,55
C04A	CR-39	Salão do Carneiro (A)	-5,5
C04A	LEXAN	Salão do Carneiro (A)	-5,5
C08B	CR-39	Salão do Carneiro (B)	-1,98
C08B	LEXAN	Salão do Carneiro (B)	-1,98
C14A	CR-39	Salão do Altar (A)	-10,13
C14A	LEXAN	Salão do Altar (A)	-10,13
C16B	LEXAN	Salão do Altar (B)	-6,41
C11	CR-39	Salão das Colunas	1,21
C22	CR-39	Salão Vestíbulo	0,32
E05	CR-39	Corredor sede administrativa	-
E20	CR-39	Corredor sede administrativa	-
E06	CR-39	Escritório sede administrativa	-
E07	CR-39	Escritório sede administrativa	-

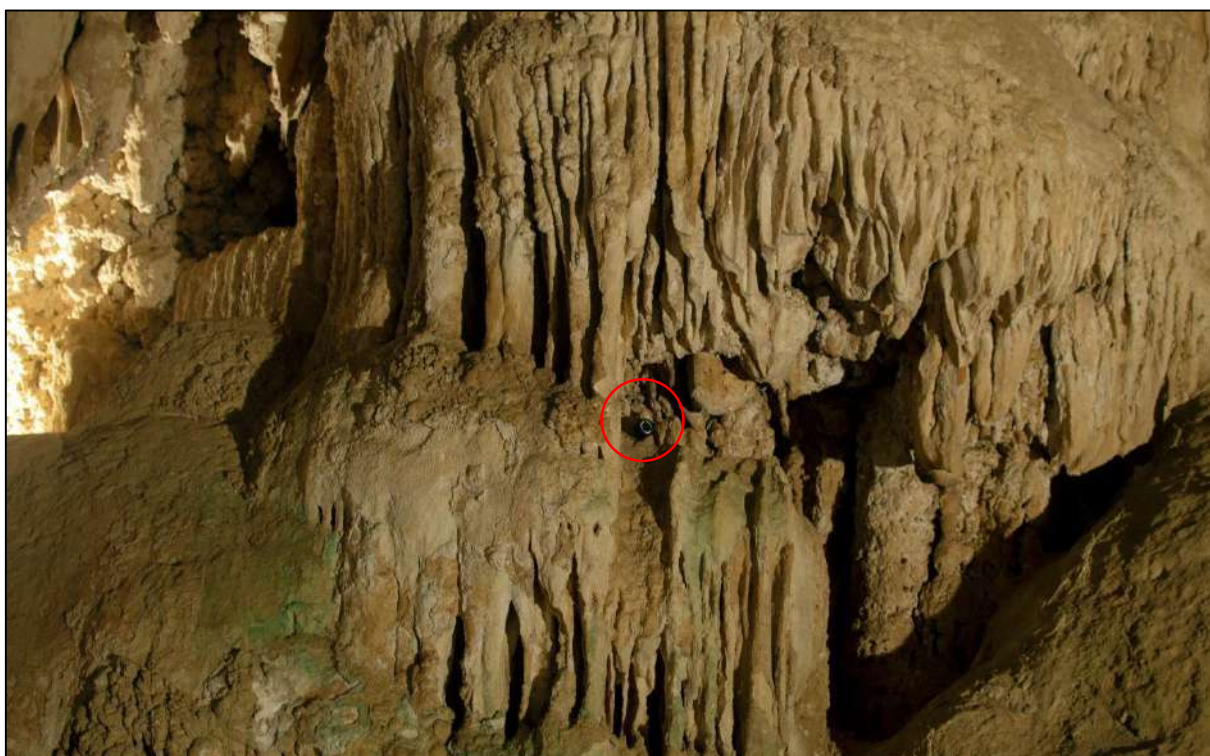
Os detectores passivos SSNTD fixados na gruta de Maquiné foram sinalizados no mapa da Figura 26. Os detectores passivos iniciados com o código “E”, apresentados na tabela 14 acima foram colocados após o espectrômetro de aplicações geofísicas RS-230 BGO apontar alto background no local. Os corredores e escritório central da sede administrativa são locais onde profissionais administrativos passam praticamente oito horas do turno de trabalho na gruta de Maquiné. Esse escritório e corredores são, ainda, local onde ficam os guias turísticos quando esses não estão com grupos de visitantes no interior da gruta. A partir da linha verde “X” representada no mapa a visita turística não é mais possível.

Nas Figuras 27 e 28 vemos os pares afixados no interior das grutas Rei do Mato e de Maquiné, respectivamente.

Figura 27 - Detectores SSNTD na gruta Rei do Mato.



Figura 28 - Detectores de traço na gruta de Maquiné.



Na Tabela 15 são apresentadas as datas de colocação e retirada dos detectores SSNTD:

Tabela 15 – Tempo de detecção dos SSNTD.

TEMPO DE EXPOSIÇÃO DOS SSNTD			
LOCAL	ENTRADA	SAÍDA	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (dias)
Gruta Rei do Mato	30/11/2018	22/03/2019	112
Gruta de Maquiné	09/11/2018	19/03/2019	128

Após a exposição ao ^{222}Rn pelo período aproximado de 4 meses, os pares de detectores foram retirados do interior das grutas, selados novamente para impedir novas irradiações e acondicionados em temperatura ambiente até serem levados para o laboratório para que fossem revelados. Na Figura 29 abaixo é possível ver os pares selados retirados da gruta de Maquiné:

Figura 29 - Detectores SSNTD selados.



A metodologia utilizada para a revelação dos traços sobre o filme, causados pelas partículas carregadas, foi a mesma realizada e publicada por Takahashi *et al* (2017). O método foi aplicado em detectores SSNTD com filme CR-39. Os detectores foram colocados em câmaras de calibração juntamente com dois detectores AlphaGuard®

e fontes de Ra-226 com atividades de 3,779 kBq referenciadas pelo NIST, onde foram obtidos seis diferentes tipos de exposição. Os detectores com filmes de aproximadamente 1x1,5 cm foram retirados das câmaras expostas ao Rn-222, tratados com uma solução química básica de 6,25M de NaOH com 2% de álcool, numa temperatura de 75°C para ampliação dos traços, afim de se conseguir visualização em microscópio óptico comum e, assim, possibilitar a contagem dos traços manualmente ou automaticamente. Após o ataque químico os filmes passaram por uma lavagem em água corrente. O fator de conversão (K) é determinado empiricamente. Em Takahashi *et al* (2017) o fator de calibração encontrado foi $K = 52,028 \pm 0,752$.

4.2.4 Análise com as câmaras de eletretos – Detecção passiva

Nas grutas Rei do Mato e Maquiné, nos mesmos pontos definidos para análise dos detectores SSNTD foram colocadas câmaras de difusão (Figura 30) com eletretos *short-term E-perm* da fabricante norte americana *Rad Elec Inc.* (Figura 31) para análise passiva. O uso de diferentes meios de medida aumentou o espectro da análise, tornando-a mais robusta.

Figura 30 - Câmaras de difusão E-perm.



Fonte: o fabricante.

Figura 31 - Eletretos E-perm.



Fonte: o fabricante.

Na gruta da Lapinha as câmaras de difusão com os eletretos *short-term* foram fixadas ao longo de toda sua extensão de área visitável, monitorando os salões acessíveis a visitantes e monitores diariamente.

Os eletretos foram medidos quanto a sua voltagem antes e depois da exposição em redundância com a utilização de dois leitores modelo SPER-1E Reader da fabricante *Rad Elec Inc.* Os leitores e os eletretos utilizados estão representados na Figura 32.

Figura 32 - Leitores SPER-1E durante a análise.



Os eletretos ficaram expostos ao gás nas grutas em um período próximo a 20 horas. O cálculo da concentração foi feito com a utilização do software *Quick Calculator* na página do fabricante (*disponível em <http://radelec.com/qc>*) conforme apresenta a Figura 33 a seguir:

Figura 33 - Quick Calculator Rad Elec.

Radon - Single	SI Units	S Chamber	Short-Term	Measured Value	60	nGy/hr	500	m
Device Serial	Test Date/Time	Area Value	Test Date/Time	Test Value	Area Units	Area	W. Corr.	
1 SFZ231	07/12/2019 4:52 pm	202	07/13/2019 9:57 am	197	17.08	129.7	20.44	

Calculate Clear Print

Test Results 129.7

WARNING: Results not saved to database

Fonte: <https://radelec.com/qc/>.

A Figura 34 apresenta o monitoramento simultâneo do Alpha Guard®, Alpha E® e das Câmaras de eletretos na gruta do Maquiné. Nas Figuras 35 e 36 são apresentadas câmaras de eletretos fixadas na gruta do Maquiné:

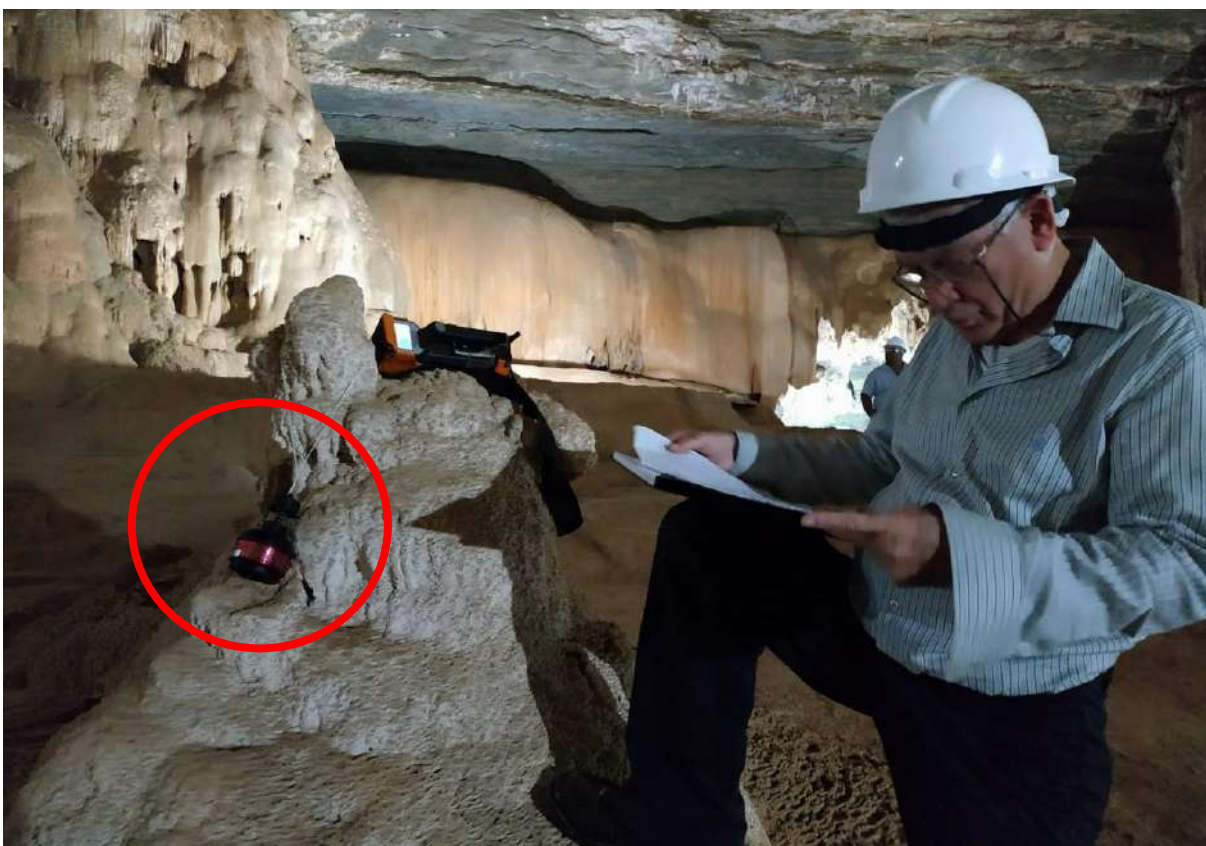
Figura 34 - Equipamentos em funcionamento - Gruta do Maquiné.



Figura 35 - Câmara de eletretos em funcionamento.



Figura 36 - Monitoramento do espectro local.



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn – ALPHA GUARD®

Na análise preliminar com o uso do AlphaGuard®, no dia da colocação dos detectores SSNTD (Verão) e eletretos (Inverno), a concentração média e instantânea (duas horas de exposição) encontrada nas grutas pode ser observada na Tabela 16 abaixo:

Tabela 16 - Concentração de radônio nas grutas: AlphaGuard®.

GRUTAS TURÍSTICAS DA ROTA PETER LUND			
-	MAQUINÉ	REI DO MATO	LAPINHA
CONCENTRAÇÃO (Bq.m⁻³)	2000 a 3400	340 a 500	<45
INCERTEZA (Bq.m⁻³)	±720	±80	-

A variação apresentada na tabela anterior refere-se à margem de erro descrita pelo próprio equipamento. As fotografias representadas nas figuras 37, 38 e 39 abaixo apresentadas foram tomadas durante a medição:

Na análise posterior, feita com o AlphaGuard® durante a colocação das câmaras de eletretos, nas grutas do Maquiné e da Lapinha o aparelho ficou em funcionamento, em um período de inverno, por aproximadamente 20 horas. Os resultados da média aritmética das contagens podem ser encontrados na tabela a seguir:

Tabela 17 - Resultados AlphaGuard (20 horas).

GRUTAS TURÍSTICAS DA ROTA PETER LUND			
-	MAQUINÉ	REI DO MATO	LAPINHA
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (Bq/m³)	408	-	122
INCERTEZA	±74		±63
NÚMERO DE CONTAGENS	124	-	17
DATA DA ANÁLISE	11/07/2019 a 12/07/2019		12/07/2019 a 13/07/2019

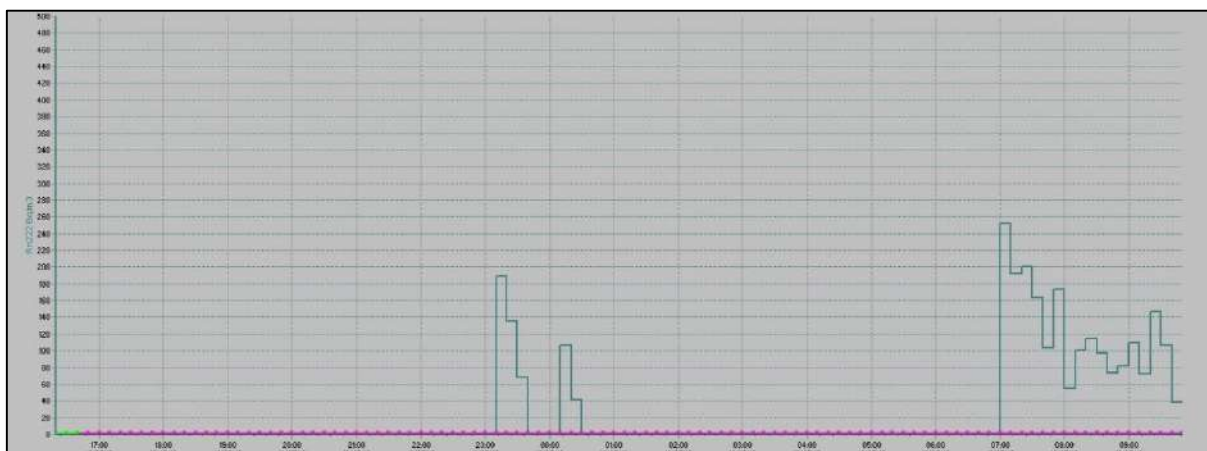
Dentro das 124 contagens intervaladas em 10 minutos na análise feita na gruta do Maquiné, a maior concentração encontrada foi de 728 Bq.m^{-3} às 09:40 pm. Observou-se claramente a tendência de elevação no período noturno. Um dos motivos que pode colaborar com tal comportamento está no fato das grutas de visitação turística estarem fechadas ao público no período noturno e, sem movimento, o gás pode ser detectado em sua totalidade nesses ambientes. O comportamento da concentração do gás pode ser visto na Figura 37 abaixo:

Figura 37 - Concentração de radônio – AlphaGuard.



Na gruta da Lapinha, em decorrência aparente de problemas técnicos com o equipamento, apenas 17 contagens estiveram acima do nível detectável de ^{222}Rn . Essas 17 contagens foram feitas no período entre 07:10 am e 09:50 am, iniciando com a maior concentração, de 252 Bq.m^{-3} às 07:10 am, reduzindo a concentração até 09:50 am. A seguir, na Figura 38, é possível analisar o comportamento anômalo do AlphaGuard na detecção de ^{222}Rn durante a aferição na gruta da Lapinha:

Figura 38 - Concentração de radônio – AlphaGuard.



Em decorrência do problema apresentado, esta aferição não pode ser feita na gruta Rei do Mato.

5.2 CONCENTRAÇÃO DE ²²²Rn – ALPHA E®

A concentração de ²²²Rn analisada com o AlphaE® foi aferida juntamente com o AlphaGuard® e câmara de eletretos, num período sazonal de inverno. Na Tabela 18 encontram-se os resultados de concentração determinados pelo AlphaE®:

Tabela 18 - Resultados AlphaE (20 horas).

GRUTAS TURÍSTICAS DA ROTA PETER LUND			
-	MAQUINÉ	REI DO MATO	LAPINHA
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (Bq.m⁻³)	548	-	144
NÚMERO DE CONTAGENS	126	-	105
DATA DA ANÁLISE	11/07/2019 a 12/07/2019		12/07/2019 a 13/07/2019

5.3 CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn – DETECTORES SSNTD

As Tabelas 19 e 20 abaixo apresentam resultados revelados nos detectores SSNTD. Os resultados NR (não revelados) para o filme LEXAN não foram apresentados em decorrência de problemas no equipamento para revelação. O laboratório responsável pela revelação no Rio de Janeiro não estava em condições para realizar a revelação no período de realização desta pesquisa.

Nos apêndices A e B anexados a este trabalho é possível encontrar os dados dos levantamentos topográficos feitos para determinação da profundidade dos detectores SSNTD.

Tabela 19 – Resultados SSNTD: Gruta Rei do Mato.

PROFUNDIDADE DOS DETECTORES SSNTD NA GRUTA REI DO MATO					
CÓDIGO	TIPO DE FILME	LOCALIDADE	PROFUNDIDADE (m) (Em relação à Boca da caverna)	CONCENTRAÇÃO ^{222}Rn (Bq.m ⁻³)	INCERTEZA (Bq.m ⁻³)
C12A	CR-39	Salão das Raridades (A)	-27,17	133.1	4.52
C02A	LEXAN	Salão das Raridades (A)	-27,17	NR	NR
C19B	CR-39	Salão das Raridades (B)	-25,93	224.4	5.93
C01B	LEXAN	Salão das Raridades (B)	-25,93	NR	NR
C15A	CR-39	Salão Principal (A)	-27,43	LD	LD
C03A	LEXAN	Salão Principal (A)	-27,43	NR	NR
C17B	CR-39	Salão Principal (B)	-23,47	114.1	4.33
C04B	LEXAN	Salão Principal (B)	-23,47	NR	NR
C18	CR-39	Salão Principal	-18,90	119.1	4.30
C05	LEXAN	Salão Principal	-18,90	NR	NR
C10	CR-39	Salão dos Blocos Desabados	-12,13	183.4	5.76
C06	LEXAN	Salão dos Blocos Desabados	-12,13	NR	NR
C09	CR-39	Salão da Couve-Flor	0,31	75.8	3.22
C07	LEXAN	Salão da Couve-Flor	0,31	NR	NR

Tabela 20 - Resultados SSNTD: Gruta de Maquiné.

PROFUNDIDADE DOS DETECTORES SSNTD NA GRUTA DE MAQUINÉ					
CÓDIGO	TIPO DE SSNTD	LOCALIDADE	PROFUNDIDADE (m) (Em relação à Boca da caverna)	CONCENTRAÇÃO ²²² Rn (Bq.m ⁻³)	INCERTEZA (Bq.m ⁻³)
C01A	CR-39	Salão Peter Lund (A)	-10,16	180.1	5.21
C01A	LEXAN	Salão Peter Lund (A)	-10,16	NR	NR
C03B	CR-39	Salão Peter Lund (B)	-12,55	233.3	6.06
C02	CR-39	Salão das Fadas	-4,55	199.3	NR
C02	LEXAN	Salão das Fadas	-4,55	NR	5.49
C04A	CR-39	Salão do Carneiro (A)	-5,5	245.9	NR
C04A	LEXAN	Salão do Carneiro (A)	-5,5	NR	6.41
C08B	CR-39	Salão do Carneiro (B)	-1,98	224.5	NR
C08B	LEXAN	Salão do Carneiro (B)	-1,98	NR	5.93
C14A	CR-39	Salão do Altar (A)	-10,13	224.6	NR
C14A	LEXAN	Salão do Altar (A)	-10,13	NR	5.90
C16B	LEXAN	Salão do Altar (B)	-6,41	NR	NR
C11	CR-39	Salão das Colunas	1,21	204.5	5.69
C22	CR-39	Salão Vestíbulo	0,32	99.6	3.66
E05	CR-39	Corredor sede administrativa	-	90.6	3.55
E20	CR-39	Corredor sede administrativa	-	70.9	2.94
E06	CR-39	Escritório sede administrativa	-	66.3	2.88
E07	CR-39	Escritório sede administrativa	-	39.1	2.03

As Figuras 39 e 40 abaixo demonstram a correspondência entre a concentração de ²²²Rn e sua posição ou profundidade em relação à boca das grutas. Há uma redução da concentração do gás à medida que se aproxima da boca da gruta, dada a proximidade com o meio externo. Porém, essa redução de concentração não se faz regra e não existe qualquer linearidade, uma vez que a constituição das grutas é variada, podendo possuir fraturas ou aberturas de janelas ao longo dos salões que irão influir diretamente na concentração de ²²²Rn. Importante destacar que nenhuma das grutas estudadas possuem ventilação forçada.

Figura 39 - Gráfico de profundidade e concentração SSNTD – Maquiné.

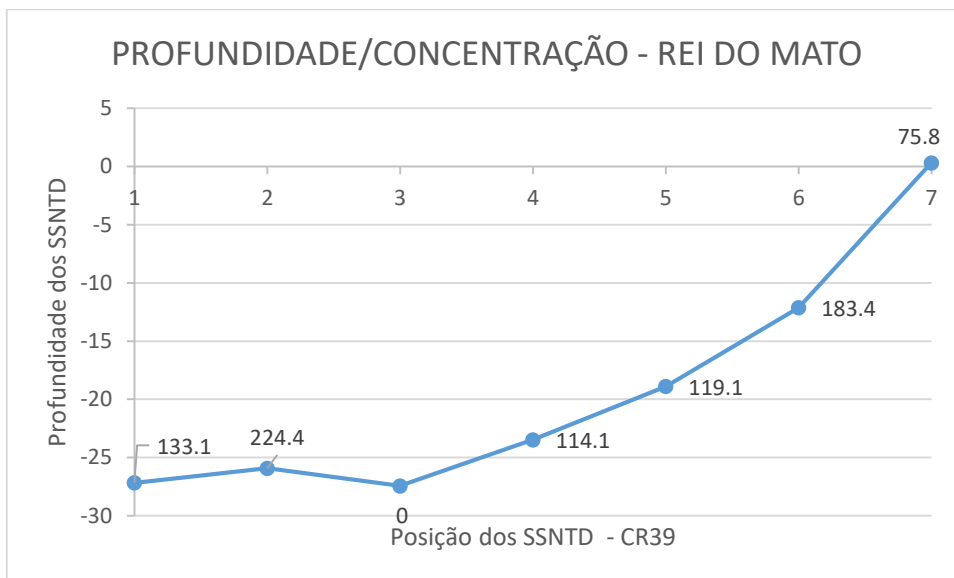
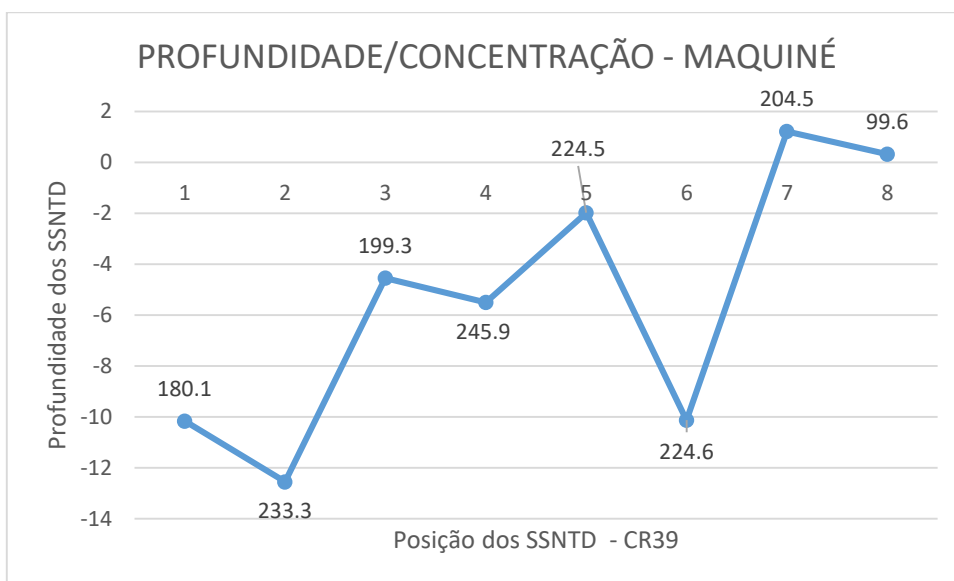


Figura 40 - Gráfico de profundidade e concentração SSNTD – Maquiné.



5.4 CONCENTRAÇÃO ^{222}Rn – CÂMARAS DE ELETRETOS

Os resultados das análises feitas com o uso das câmaras de difusão/eletretos E-perm estão representados pelas Tabelas 21, 22 e 23 a diante:

Tabela 21 - Resultados Câmara Eletretos – Gruta Rei do Mato.

ANÁLISE COM ELETRETOS E-PERM – GRUTA REI DO MATO					
POSIÇÃO	SÉRIE	LOCAL	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (Horas)	CONCENTRAÇÃO ^{222}Rn (Bq.m^{-3})	INCERTEZA (Bq.m^{-3})
I	SFZ – 231	SALÃO DAS RARIDADES	22.33	1013.7	58.35
II	SFZ – 186	SALÃO DAS RARIDADES	22.37	1430.3	77.36
III	SFZ – 153	SALÃO PRINCIPAL	22.32	1138.5	64.33
IV	SFZ – 098	SALÃO PRINCIPAL	22.22	1077.2	62.37
V	SFZ – 133	SALÃO DOS BLOCOS DESABADOS	22.17	1083.1	62.71
VI	SFZ – 113	SALÃO DA COUVE-FLOR	22.10	991.9	59.22

Tabela 22 - Resultados Câmara de Eletretos - Gruta do Maquiné.

ANÁLISE COM ELETRETOS E-PERM – GRUTA DO MAQUINÉ					
POSIÇÃO	SÉRIE	LOCAL	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (Horas)	CONCENTRAÇÃO ²²²Rn (Bq.m⁻³)	INCERTEZA (Bq.m⁻³)
I	SFZ – 284	SALÃO PETER LUND	21.08	1555.2	85.07
I	SFZ – 233	SALÃO PETER LUND	21.08	789.3	44.99
II	SFZ – 017	SALÃO DAS FADAS	20.99	638.7	44.39
III	SFZ – 051	SALÃO DO CARNEIRO	20.80	581.8	42.76
IV	SFZ – 049	SALÃO DO ALTAR	20.43	605.3	43.58
V	SFZ – 178	SALÃO DO ALTAR	20.37	545.6	41.90
VI	SFZ – 217	SALÃO DAS COLUNAS	20.27	838.2	52.56
VII	SFZ – 080	SALÃO VESTÍBULO	20.18	133.6	31.88
VIII	SFZ – 234	ESCRITÓRIO ADMINISTRAÇÃO	20.20	218.7	29.89
IX	SFZ – 258	CORREDOR ADMINISTRAÇÃO	19.98	128.3	30.61

Tabela 23 - Resultados Eletretos - Gruta da Lapinha.

ANÁLISE COM ELETRETOS E-PERM – GRUTA DA LAPINHA					
POSIÇÃO	SÉRIE	LOCAL	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (Horas)	CONCENTRAÇÃO ²²²Rn (Bq.m⁻³)	INCERTEZA (Bq.m⁻³)
I	SFZ – 234	SALÃO DA COUVE-FLOR	17.73	286.9	36.41
II	SFZ – 017	SALÃO DA FILTRAÇÃO	17.58	151.4	36.12
III	SFZ – 233	SALÃO CATEDRAL	17.48	136.5	38.82
IV	SFZ – 051	SALÃO DOS ÍNDIOS	17.33	171.3	35.32
V	SFZ – 049	SALÃO LUND	17.23	348.4	41.36
VI	SFZ – 217	SALÃO PALEOTETO	17.15	227.0	37.09
VII	SFZ – 258	ÚLTIMO SALÃO	17.08	129.7	36.89

Com o auxílio do espectrômetro RS-230 BGO, cada ponto de fixação de um conjunto câmara/eletreto tiveram seu Background e taxa de urânio revelados. Na gruta de Maquiné os resultados apresentados foram representados na Tabela 24 a seguir:

Tabela 24 - Espectrometria gruta do Maquiné.

ANÁLISE COM ESPECTRÔMETRO RS-230 – GRUTA DO MAQUINÉ					
POSIÇÃO	LOCAL	BG (nSv.h⁻¹)	URÂNIO (µg/g)	CONCENTRAÇÃO ²²²Rn (Bq.m⁻³)	INCERTEZA (Bq.m⁻³)
I	SALÃO PETER LUND	58,3	5,2	1555.2	85.07
I	SALÃO PETER LUND	58,3	5,2	789.3	44.99
II	SALÃO DAS FADAS	10,3	1,5	638.7	44.39
III	SALÃO DO CARNEIRO	15,8	1,0	581.8	42.76
IV	SALÃO DO ALTAR	38,0	3,3	605.3	43.58
V	SALÃO DO ALTAR	12,9	1,0	545.6	41.90
VI	SALÃO DAS COLUNAS	13,6	1,5	838.2	52.56
VII	SALÃO VESTÍBULO	6,5	0,5	133.6	31.88
VIII	ESCRITÓRIO ADMINISTRAÇÃO	80,7	3,1	218.7	29.89
IX	CORREDOR ADMINISTRAÇÃO	72	2,3	128.3	30.61

Os resultados da espectrometria realizada na gruta da Lapinha encontram-se na Tabela 25 abaixo:

Tabela 25 - Espectrometria gruta da Lapinha.

ANÁLISE COM ESPECTRÔMETRO RS-230 – GRUTA DA LAPINHA					
POSIÇÃO	LOCAL	BG (nSv.h⁻¹)	URÂNIO (µg/g)	CONCENTRAÇÃO ²²²Rn (Bq.m⁻³)	INCERTEZA (Bq.m⁻³)
I	SALÃO DA COUVE-FLOR	65,4	2,1	286.9	36.41
II	SALÃO DA FILTRAÇÃO	18,3	1,5	151.4	36.12
III	SALÃO CATEDRAL	37,7	1,6	136.5	38.82
IV	SALÃO DOS ÍNDIOS	50,4	1,6	171.3	35.32
V	SALÃO LUND	43,3	2,1	348.4	41.36
VI	SALÃO PALEOTETO	45,5	2,0	227.0	37.09
VII	ÚLTIMO SALÃO	60,0	1,9	129.7	36.89

5.5 RESULTADOS CONSOLIDADOS DE TODOS OS MÉTODOS

Nas Tabelas 26, 27 e 28 abaixo estão expostos todos os resultados de concentração obtidos por essa pesquisa:

Tabela 26 - Resultados consolidados da concentração de Radônio.

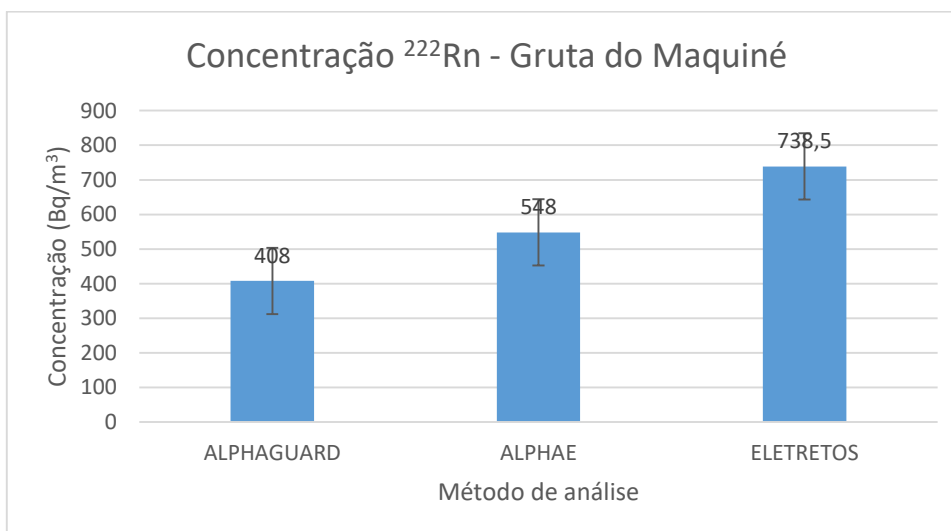
ANÁLISE DE CONCENTRAÇÃO DO ²²²Rn – GRUTA REI DO MATO (Bq.m⁻³)					
MÉTODO	ALPHAGUARD®	DETECTORES SSNTD CR-39	ALPHAGUARD®	ALPHA®	CÂMARA DE ELETRETOS
PERÍODO	VERÃO	VERÃO	INVERNO	INVERNO	INVERNO
TEMPO	2 horas	112 dias	20 horas	20 horas	20 horas
SALÃO DAS RARIDADES	-	133.1	-	-	1013.7
SALÃO DAS RARIDADES	421	224.4	-	-	1430.3
SALÃO PRINCIPAL	-	LD	-	-	-
SALÃO PRINCIPAL	-	114.1	-	-	1138.5
SALÃO PRINCIPAL	-	119.1	-	-	1077.2
SALÃO DOS BLOCOS DESABADOS	-	183.4	-	-	1083.1
COUVE-FLOR	-	75.8	-	-	991.9

Tabela 27 - Resultados consolidados da concentração de Radônio.

ANÁLISE DE CONCENTRAÇÃO DO ^{222}Rn – GRUTA DO MAQUINÉ ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)					
MÉTODO	ALPHAGUARD®	DETECTORES SSNTD CR-39	ALPHAGUARD®	ALPHA®	CÂMARA DE ELETRETOS
PERÍODO	VERÃO	VERÃO	INVERNO	INVERNO	INVERNO
TEMPO	2 horas	112 dias	20 horas	20 horas	20 horas
SALÃO PETER LUND	2710	180.1	408	548	738.5
SALÃO PETER LUND	-	233.3	-	-	789.3
SALÃO DAS FADAS	-	199.3	-	-	638.7
SALÃO DO CARNEIRO	-	245.9	-	-	581.8
SALÃO DO ALTAR	-	224.5	-	-	605.3
SALÃO DO ALTAR	-	224.6	-	-	545.6
SALÃO DAS COLUNAS	-	204.5	-	-	838.2
SALÃO VESTÍBULO	-	99.6	-	-	133.6
ESCRITÓRIO ADMINISTRAÇÃO	-	90.6	-	-	218.7
ESCRITÓRIO ADMINISTRAÇÃO	-	70.9	-	-	128.3
CORREDOR ADMINISTRAÇÃO	-	66.3	-	-	-
CORREDOR ADMINISTRAÇÃO	-	39.1	-	-	-

O gráfico comparativo na figura 41 a seguir demonstra a concentração do ^{222}Rn na gruta do Maquiné, com diferentes metodologias, no mesmo período de análise (Inverno de 2019).

Figura 41 - Gráfico: Concentração de radônio na gruta do Maquiné.

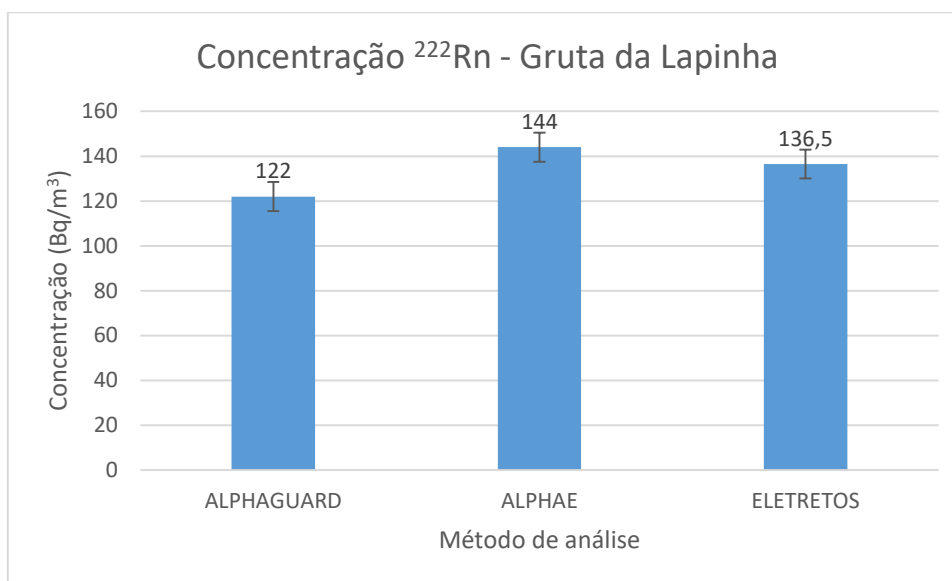


Os resultados apresentados demonstram uma diferença considerável da concentração entre os métodos utilizados. A concentração encontrada pelo AlphaGuard® no interior da gruta do Maquiné, no mesmo período de análise e ao mesmo tempo, chegou a cerca de 55% do total encontrado pelos eletretos. A grande diferença merece atenção e pode ter como resposta a calibração dos equipamentos utilizados. Os eletretos mensuram as cargas que descarregam sua superfície durante todo tempo de análise de forma aleatória, e o AlphaGuard® foi programado para contagens a cada dez minutos, resultando em médias de concentração.

Tabela 28 - Resultados consolidados da concentração de Radônio.

ANÁLISE DE CONCENTRAÇÃO DO ^{222}Rn – GRUTA DA LAPINHA (Bq.m^{-3})					
MÉTODO	ALPHAGUARD®	DETECTORES SSNTD CR-39	ALPHAGUARD®	ALPHAE®	CÂMARA DE ELETRETOS
PERÍODO	VERÃO	VERÃO	INVERNO	INVERNO	INVERNO
TEMPO	2 horas	112 dias	20 horas	20 horas	20 horas
SALÃO DA COUVE-FLOR	-	-	-	-	286.9
SALÃO DA FILTRAÇÃO	-	-	-	-	151.4
SALÃO CATEDRAL	<45	-	122	144	136.5
SALÃO DOS ÍNDIOS	-	-	-	-	171.3
SALÃO LUND	-	-	-	-	348.4
SALÃO PALEOTETO	-	-	-	-	227.0
ÚLTIMO SALÃO	-	-	-	-	129.7

Figura 42 - Gráfico: Concentração de radônio na gruta da Lapinha.



Na gruta da Lapinha, a diferença entre os métodos foi inferior à encontrada na gruta do Maquine, mas o comportamento se repetiu. Os eletretos detectaram maior concentração do que o AlphaGuard®. Aparentemente a diferença aumenta exponencialmente de acordo com a concentração.

Os resultados encontrados corroboram com os resultados de outras pesquisas feitas anteriormente no subsolo. Dada a grande quantidade de variáveis, a concentração do ^{222}Rn nas grutas irá oscilar e ocorrerá naturalmente pelas características físico-químicas do gás associadas às características geomorfológicas desses locais.

A Tabela 33 a seguir faz um comparativo entre as concentrações encontradas por essa pesquisa e demais publicações analisadas por ela.

Tabela 29 - Concentrações de radônio em outros estudos

ESTUDO	GRUTA	PAÍS	C_{Rn} ($Bq.m^{-3}$)	MÉTODO	PERÍODO SAZONAL
Presente	Rei do Mato	Brasil	991 - 1430	ELETRETOS	INVERNO
Presente	Rei do Mato	Brasil	76 - 224	SSNTD	VERÃO
Presente	Rei do Mato	Brasil	421	ALPHAGUARD	VERÃO
Presente	Do Maquiné	Brasil	133 - 789	ELETRETOS	INVERNO
Presente	Do Maquiné	Brasil	99 - 245	SSNTD	VERÃO
Presente	Do Maquiné	Brasil	408	ALPHAGUARD	INVERNO
Presente	Do Maquiné	Brasil	2710	ALPHAGUARD	VERÃO
Presente	Do Maquiné	Brasil	548	ALPHAE	INVERNO
Presente	Lapinha	Brasil	129 - 286	ELETRETOS	INVERNO
Presente	Lapinha	Brasil	<45	ALPHAGUARD	VERÃO
Presente	Lapinha	Brasil	122	ALPHAGUARD	INVERNO
Presente	Lapinha	Brasil	144	ALPHAE	INVERNO
Alberigi & Pecequilo (2011)	Santana	Brasil	5800-8400	SSNTD	VERÃO
Alberigi & Pecequilo (2011)	Santana	Brasil	1900-2800	SSNTD	INVERNO
Alberigi (2011)	Morro Preto	Brasil	189 - 227	SSNTD	INVERNO
Alberigi (2011)	Morro Preto	Brasil	132 - 447	SSNTD	VERÃO
Hedt & Boal (1998)	Buchan Caves	Austrália	9664	ALPHAGUARD	VERÃO
Gouvea (1996)	Indeterminado	Brasil	473	SSNTD	Não Informado

5.6 DETERMINAÇÃO DA DOSE EFETIVA POR INALAÇÃO

Como as câmaras de difusão com eletretos foi um método utilizado nas três grutas analisadas, e estes apresentaram-se como o pior cenário de concentração do ^{222}Rn , utilizou-se a média aritmética da concentração encontrada por este método nessas cavidades, para o cálculo de dose efetiva de radiação a que estão expostos os guias de turismo, espeleólogos e trabalhadores locais. A determinação da dose efetiva por inalação do ^{222}Rn foi calculada a partir da equação:

$$E = CRn.F.t.d.u$$

Tabela 30 - Dose Efetiva anual: exposição de 240 horas/ano.

Gruta	C_{Rn} (Bq/m ³)	F	t (h)	d (mSv/mJ.h.m ⁻³)	u (mJ.m ⁻³ /Bq.m ⁻³)	Dose Efetiva (mSv/a)
Rei do Mato	1122	0,5	240	1,4	5,6x10 ⁻⁶	1,056
Maquiné	521	0,5	240	1,4	5,6x10 ⁻⁶	0,491
Lapinha	207	0,5	240	1,4	5,6x10 ⁻⁶	0,195

Tabela 31 - Dose Efetiva anual: exposição de 480 horas/ano.

Gruta	C_{Rn} (Bq/m ³)	F	t (h)	d (mSv/mJ.h.m ⁻³)	u (mJ.m ⁻³ /Bq.m ⁻³)	Dose Efetiva (mSv/a)
Rei do Mato	1122	0,5	480	1,4	5,6x10 ⁻⁶	2,111
Maquiné	521	0,5	480	1,4	5,6x10 ⁻⁶	0,980
Lapinha	207	0,5	480	1,4	5,6x10 ⁻⁶	0,389

Tabela 32 - Dose Efetiva anual: exposição de 720 horas/ano.

Gruta	C_{Rn} (Bq/m ³)	F	t (h)	d (mSv/mJ.h.m ⁻³)	u (mJ.m ⁻³ /Bq.m ⁻³)	Dose Efetiva (mSv/a)
Rei do Mato	1122	0,5	720	1,4	5,6x10 ⁻⁶	3,167
Maquiné	521	0,5	720	1,4	5,6x10 ⁻⁶	1,470
Lapinha	207	0,5	720	1,4	5,6x10 ⁻⁶	0,584

Tabela 33 - Dose Efetiva anual: exposição de 2000 horas/ano.

Gruta	C_{Rn} (Bq.m ⁻³)	F	t (h)	d (mSv/mJ.h.m ⁻³)	u (mJ.m ⁻³ /Bq.m ⁻³)	Dose Efetiva (mSv/a)
Rei do Mato	1122	0,5	2000	1,4	5,6x10 ⁻⁶	8,796
Maquiné	521	0,5	2000	1,4	5,6x10 ⁻⁶	4,085
Lapinha	207	0,5	2000	1,4	5,6x10 ⁻⁶	1,622

As Tabelas 29, 30, 31 e 32 referem-se a simulações de exposição dos guias de turismo nas grutas da Rota Lund. Essas simulações foram feitas com base nas horas anuais que eles podem estar expostos ao ²²²Rn, utilizando a variável de concentração média aferida nos eletretos durante as análises. A constante adimensional fator de equilíbrio (F) utilizada é a mesma recomendada por trabalhos encontrados na

literatura, como em Alberigi (2011), sendo os fatores de conversão “d” e “u” igualmente constantes.

Na Tabela 29 os cálculos foram feitos simulando uma exposição de cinco horas semanais, correspondendo a uma descida completa e diária à gruta. Nas demais Tabelas essa simulação considerou 10, 15 e 40 horas semanais, considerando duas, três e oito descidas completas e diárias à gruta, respectivamente, com duração de 1 hora o tempo de cada descida.

Tomando a concentração recomendada pela ICRP (1000 Bq.m^{-3}) como parâmetro, as simulações de exposição feitas acima e a concentração encontrada em algumas câmaras das grutas analisadas demonstram a necessidade de monitoramento frequente nesses locais e um plano de mitigação não deve ser descartado.

Os resultados inéditos apresentados por essa pesquisa servirão como ponto de partida para futuras análises de concentração e exposição nestes locais. Os valores de concentração encontrados não trazem consigo uma necessidade de alarde, mas carecem maior atenção e a necessidade de frequente monitoramento nestes locais se apresenta como necessária. Os valores de concentração encontrados em algumas camaras específicas estão próximos ou acima daqueles recomendados pela UNSCEAR de 1000 Bq.m^{-3} .

6 CONCLUSÃO

A concentração do radônio-222 foi determinada nas três grutas turísticas, com plano de manejo, que compõem ao projeto turístico denominado Rota Lund. São elas: gruta Rei do Mato, gruta do Maquiné e gruta da Lapinha. As concentrações encontradas têm variações entre as cavidades, entre os diferentes salões de cada cavidade, variações sazonais, diárias e entre os diferentes métodos utilizados.

O comportamento de variação diária foi observado na análise de 20 horas com a utilização da câmara de ionização AlphaGuard®, com a tendência de elevação da concentração no período noturno. Um dos fatores de redução da concentração durante o dia pode estar ligado à abertura dos portões e movimentações provocadas pelas visitas que essas grutas recebem todos os dias, em frequência variável e de difícil controle.

As medidas tomadas com a utilização das câmaras de eletretos e detectores SSNTD demonstraram a variação entre os diferentes salões, com clara redução de concentração à medida que os detectores estiveram expostos em regiões mais ventiladas, como próximo às bocas das grutas. A concentração encontrada entre os salões da gruta da Lapinha demonstrou que quanto mais confinado e reduzido o salão, maior a tendência de acumulação de ^{222}Rn . Esse aumento na concentração não está atrelado à sequência dos salões visitáveis, uma vez que a maior concentração encontrada foi no sexto salão desta gruta, restando ainda de três a quatro salões a serem visitados. Esse comportamento não se repetiu nas grutas do Maquiné e Rei do Mato, onde a maior concentração foi encontrada no último salão visitável, que está mais baixo e distante em relação a boca da gruta.

A diferença de concentração sazonal foi demonstrada na concentração aferida pelo AlphaGuard®, porém não pode ser considerada conclusiva, dado o período diferente de exposição do equipamento.

Embora as grutas pesquisadas possuam a mesma constituição rochosa, calcários em regiões onde predomina o carste, a concentração entre elas pode variar

consideravelmente. O diferente fluxo interno de pessoas, as características de solo, formação das galerias e infiltração de água podem influenciar diretamente na variação de concentração de acordo com outros trabalhos já publicados.

A utilização de diferentes métodos de análise demonstra que existem discrepâncias consideráveis entre esses quando expostos simultaneamente ao mesmo ambiente. Entre os métodos de análise envolvendo as câmaras de ionização AlphaGuard® e AlphaE® encontrou-se uma discrepância que variou de 15% a 25%. E essa diferença foi ainda maior entre as câmaras de ionização e eletretos, chegando a uma diferença de concentração de 55% na análise feita na gruta do Maquiné. Considerando que essa diferença ficou entre 6% e 10% na gruta da Lapinha, acredita-se que a tendência de aumento da discrepância é diretamente proporcional ao aumento da concentração de radônio. A utilização do AlphaGuard® pode ser conclusiva apenas na medida tomada na gruta do Maquiné, onde sua análise corrobora com as demais. Sua falha durante as medições na gruta da Lapinha deixa em aberto esses resultados, bem como impossibilitou a análise na gruta Rei do Mato por este método.

Os resultados comparativos entre os eletretos, expostos durante cerca de 20 horas e os detectores SSNTD, expostos por cerca de 120 dias demonstraram grande discrepância. Os eletretos ficaram expostos proporcionalmente em maior tempo num período noturno, onde espera-se maior concentração. Já os resultados dos SSNTD foram obtidos através de uma média durante um período relativamente longo (cerca de 120 dias), se comparado à exposição dos eletretos.

As concentrações do ^{222}Rn nas grutas analisadas estão abaixo dos níveis encontrados em outros estudos. Altas concentrações do gás foram encontradas nas cavernas do PETAR, que possuem formação calcária assim como as cavernas do presente estudo.

Dadas as concentrações encontradas por este estudo, a dose efetiva que recebem os guias de turismo, espeleólogos e outros trabalhadores nestas cavidades no período e condições em que ele foi realizado é inferior às recomendadas pelos órgãos competentes na maior parte das análises. Porém, foram apresentados alguns resultados cima dos recomendados pela ICRP, sinalizando a necessidade de maior

atenção e monitoramento constante desses locais. Considerando que os visitantes frequentam essas estruturas em eventos esporádicos, a dose absorvida por esses se torna irrisória, e dispensa preocupações.

A análise feita, através de espectrômetro, nas grutas da Lapinha e do Maquiné demonstrou que a quantidade de urânio na constituição das rochas e ambiente da Lapinha está dentro do esperado para formações calcárias, com cerca de 2,0 ppm de urânio. Já na gruta do Maquiné, o urânio detectado está acima desta média, tendo, em alguns locais, apresentado cerca de 5,0 µg/g.

O presente trabalho espera contribuir com a literatura, passando a figurar como importante indicador desses locais de visitação pública. Após a realização da pesquisa bibliográfica, onde não foram encontradas bases comparativas nessas localidades, o presente estudo passou a figurar como fonte primária para análise de concentração de radônio-222 nas grutas turísticas da rota Peter Lund, e espera que novos trabalhos possam vir contribuir com a questão, movimentando a opinião e o poder público para esse indicador seja incluído nos próximos estudos de manejo, por exemplo.

7 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Durante as pesquisas realizadas que viabilizaram o nascimento desta dissertação de mestrado, algumas perguntas que apareceram ficaram sem respostas. Essas “pontas soltas” serão a força motriz que movimentará novos trabalhos. A primeira intenção é retomar as medidas de quantificação do ^{222}Rn nas grutas analisadas, empregando à gruta da Lapinha os detectores SSNTD e, em todas as grutas analisadas nesta pesquisa, realizar a quantificação do gás radioativo em períodos sazonais diferenciados para efeitos comparativos. Ainda na sequência do trabalho serão feitas as revelações dos filmes LEXAN, não possíveis até a conclusão deste.

Uma segunda pergunta que ficou sem resposta apareceu quando os detectores SSNTD foram retirados das grutas de Maquiné e Rei do Mato. Ao serem levados para análise laboratorial para que fossem reveladas as densidades dos traços e conseqüentemente terem as respectivas câmaras de difusão abertas, foi identificado no interior dessas uma espécie de cristalizado, material solidificado e com comportamento aparentemente uniforme que pode ser visto na Figura 43 abaixo. Esse mesmo material apareceu por entre as câmaras de difusão que formaram pares, em suas partes externas, conforme demonstra a Figura 44. Levantou-se a hipótese de serem os filhos do radônio em estado sólido ali depositados. Diante disso, propõe-se levar essas câmaras plásticas para análises:

- Difração de raios-x.
- MEV – microscopia eletrônica de varredura.

Figura 43 - interior da câmara suporte do SSNTD.



Figura 44 - exterior da câmara suporte do SSNTD.



As análises destes materiais sólidos é mais uma vertente a servir como continuação desta pesquisa no futuro.

Uma terceira dúvida surgida durante a realização desta pesquisa refere-se à adaptabilidade dos seres vivos que habitam as cavidades subterrâneas. Morcegos, aracnídeos e outros tipos de troglóbios. Como esses seres sobrevivem com irradiações constantes e quais as diferenças biológicas entre eles e os seres que vivem fora das cavidades são perguntas que podem ser respondidas a partir de novas pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, J.C. Elemento químico: Radônio. Química nova na escola. São Paulo, v.32, p. 267-268, nov. 2009.

AFONSO, J.C. Elemento químico: Polônio. Química nova na escola. São Paulo, v.33, p. 129-130, mai. 2011.

AGARD, S. S.; GUNDERSEN, L.C. The geology and geochemistry of soils in Boyertown and Easton, Pennsylvania. Field Studies of Radon in Rock, Soils and water, p. 51 – 63, Florida, 1993.

AGUIAR, B. F.; LOUREIRO, F. T. Curso de introdução à espeleologia da Sociedade Excursionista & Espeleológica: a difusão da espeleologia na universidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34, 2017. Ouro Preto. Anais... Campinas: SBE, 2017. p.127-131. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe_127-131.pdf. Acesso em: 18/04/2018.

AJAYI, K. *et al.* Numerical investigation of the effectiveness of radon control measures in cave mines. International Journal of Mining Science and Technology – Elsevier B.V. on behalf of China University of Mining & Technology. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268618301873>. Acesso em 08/03/2019.

ALBERIGI, S. Avaliação da exposição ao radônio 222 nas cavernas do parque estadual turístico do alto do Ribeira (PETAR). 2006. 73f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

ALBERIGI, S.; PECEQUILO, B.R.S. Níveis de Radônio em cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira – PETAR. Pesquisa em turismo e paisagens cársticas – SeTur/SBE, Campinas, v.1 n.1, pág. 43-55, 2008.

ALBERIGI, S. Sobre a influência de fatores ambientais nos níveis de radônio em cavernas dos parques estaduais do vale do Ribeira, SP e Avaliação do equilíbrio radioativo e do fator de equilíbrio. 2011. 105f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

ARAMBURU, X.O.; BISBAL, J.J. Radiaciones Ionizantes: utilización y riesgos. 2ª ed. Barcelona: Serví de Publicaciones de la UPC, 1994. 459p.

ATHAYDE, E.S. Impactas Ambientais e o Planejamento Turístico em Áreas Cársticas. In: Congresso Internacional de Espeleologia, XIII, 2001. Brasília. Anais... Distrito Federal: 2001.

BANJANAC, R.; DRAJIC, A.; *et al.* Indoor radon measurements by nuclear track detectors: application in secondary schools. Facta Universitatis. Physics, Chemistry and Technology, Beograd, v.4 n.1, pág. 93-100, 2006.

BARBOSA, M.F.P.; BRAGA, S.S; *et al.* Rota das Grutas Peter Lund, patrimônio cultural e turismo: possibilidades e limitações. In: 3º COLÓQUIO IBERO-AMERICANO PAISAGEM CULTURAL, PATRIMÔNIO E PROJETO – DESAFIOS E PERSPECTIVAS, 2014. Anais... Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Gabriel_Campos7/publication/291347426. Acesso em 07/03/2019.

BASKARAN, M. Radon: A tracer for geological, geophysical and geochemical studies. 1ª ed. Switzerland: Springer, 2016. 276p.

BENTON, E.V.; HENKE, R.P. Sensitivity Enhancement of Lexan Nuclear track detector: Nuclear instruments and methods 70, v.1, pág. 183 e 184, 1969.

BERBERT-BORN, M. Carste de Lagoa Santa: Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil – SIGEP. Disponível em <http://sigep.cprm.gov.br/sitio015/sitio015.htm>. Acesso em 22/01/2019.

COMMITTEE ON RISK ASSESSMENT OF EXPOSURE TO RADON IN DRINKING WATER. Risk assessment of radon in drinking water. National Academy Press. Washington DC: 1999.

CPRM-BH – Companhia de pesquisa de recursos mineral. Projeto Sete Lagoas – Abaeté. Programa geologia do Brasil. Belo Horizonte, 2010. 160p.

CRAVEN, S.A.; SMIT, B.J. Radon in Caves: Clinical Aspects: International Journal of Speleology, v. 35, n. 2, pág. 93–101, 2006.

DICKIN, A.P. Radiogenic Isotope Geology. 2^a ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 492p.

DUPIN, I.S.; SELMINI, M.C. Traços em CR-39: Análise por microscopia óptica e software imagem pró-plus. In: Congresso de tecnologia Fatec, XIX, 2017. São Paulo. *Anais...* São Paulo: 2017.

FIGUEIREDO, L.A.V. Espeleoturismo e as contribuições da educação ambiental: aspectos históricos e relatos de experiências formativas no Brasil e no México. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, XXXIII, 2015. Eldorado. *Anais...* Campinas: SBE, 2015. p.697-710.

FIELD, M. S. Risk to cavers and cave workers from exposures to low-level ionizing α Radiation from ^{222}Rn decay in caves. Journal of cave and Carst studies. Washington D.C., v.69, n.1, p. 207-228, abr. 2007.

FONSECA, E.S. Algumas características do detector sólido de traços CR-39 para registro de prótons e partículas alfa de baixa energia. 1983. 55f. Dissertação. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Rio de Janeiro.

FONT, LI.; BAIXERAS, C.; MORENO, V. Indoor radon levels in underground workplaces of Catalonia, Spain. Radiation Measurements – Elsevier Science Direct.

Bellaterra, v.43, p. 467-470, 2008.

GILLMORE, G. K; SPERRIN, M; *et al.* Radon hazards, geology and exposure of cave users: a case study and some theoretical perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Amsterdam, v.46, n.3, p. 279-288, July. 2000.

GOUVEA, V.A.; MELO, V.P.; BINNS, D.A.C. Concentração de Radônio-222 em interiores de grutas, cavernas, e em regiões de mineração em Minas Gerais. In: Congresso geral de Energia Nuclear, VI, 1996. Rio de Janeiro. *Anais...* CD-ROM, 1996.

HALL, E.J.; GIACCIA, A.J. Radiobiology for the radiologist. 7^aed. Philadelphia: Wolters Kluwer, 2012. 546p.

HEDT, J.C., & BOAL, T.J. Radon in an underground cave system in Victoria. The 5th conference of the South Pacific Environmental Radioactivity Association (SPERA) Environmental radioactivity and its application in environmental studies Conference papers. Melbourne, 1998. 292p.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation protection against Radon in workplaces other than mines. Safety Reports series N° 33, Viena, 2003.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation Biology: A Handbook for Teachers and Students. Training Course Series. N° 42, Viena, 2010.

ICRP – COMISSÃO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA. Protection Against Radon-222 at Home and at Work, ICRP publication 65, International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP 23, n.2, Oxford, Pergamon Press, 45 p.

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. Grutas da Rota Peter Lund ganham novam iluminação. Disponível em <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/1/2375-grutas-da-rota-peter-lund-ganham-nova-iluminacao>. Acesso em 10 fev. 2018.

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. Plano de Manejo do Parque Estadual do Sumidouro. Lagoa Santa. Encarte 3 – vol. 1 – A unidade de Conservação, out 2010.

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. Diagnóstico do Monumento Natural Estadual Peter Lund – Gruta de Maquiné. Viçosa, Vol.1, pag. 94-156, fev. 2012.

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. Plano de Manejo do Monumento Natural Estadual Gruta Rei do Mato. Viçosa, Vol.1, pag. 106-108, Mar. 2012.

IRD – INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA. Manual da OMS sobre radônio em ambientes internos: uma perspectiva de saúde pública. 1ªEd. São Paulo: Polo Printer, 2016. 120p.

JOBÁGY, V.; et al. A brief overview on radon measurements in drinking water. *Jornal of Environmental Radioactivity*. Amsterdam, vol.173, p.18-24, October. 2017.

JONES, W. K.; Hobbs, H. H. Iii; Wicks, C. M.; et al (2003). Recommendations and guidelines for managing caves on protected lands. Charles Town: Karst Waters Institute. (Special Publication 8).

KAERI – KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. Table of nuclides. Disponível em: <http://atom.kaeri.re.kr:8080/ton/index.html>. Acesso em 30 mar. 2018.

KAPLAN, I. Nuclear Physics. 2º Ed. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1962. 770p.

KNOLL, G.F. Radiation detection and measurement. 3ª Ed. Michigan: John Wiley & Sons, Inc., 1999. 802p.

LAMARSH, J.R.; BARATTA, A.J. Introduction to Nuclear Engineering. 3ª Ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 783p.

LOBO, H.A.S. Histórico das pesquisas espeleoclimáticas em cavernas brasileiras.

Espeleotema. Campinas, v.21, p. 131-144, dez. 2010.

MAGALHÃES, J.S.; SUYAMA, E.; FARIA, D.M.C. Estimativa de uma função de demanda para os visitantes das grutas de Rota Lund. Caderno Virtual de Turismo. Rio de Janeiro, v.17, n.2, p. 95-111, ago. 2017.

OLIVEIRA, Luiz F. Q.; GAVA, Jair; RIBEIRO, Carlos L.; ARAÚJO, Antônio R.; LIMA, Efigênia F.; MASCARENHAS, Geraldo R.; HERMANN, Hildebrando. A mineração na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Simpósio situação ambiental e qualidade de vida na Região Metropolitana de Belo Horizonte e Minas Gerais, II, 1992. Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, 1992. p. 141-145.

PRAKASH, V. Studies on indoor and outdoor radon (^{222}Rn) and its short-lived progeny concentration for the assessment of safety and health of public in the environment of coastal Kerala. Research project final Report – Payyanur College. Kerala, 2015.

PUBLIC HEALTH ENGLAND – PHE. Radon in workplace basements – An analysis of PHE measurements results and recommendations on when to test. Crown, Oxfordshire, 2016.

PILÓ, L.B. Entrevista concedida a Rafaela Mansur, Jornal O Tempo. Contagem, 20/03/2016, disponível em <https://www.otempo.com.br/cidades/l%C3%ADder-em-n%C3%BAmero-de-grutas-mg-abre-menos-de-1-dos-espas%C3%A7os-1.1263055>. Acesso em 06/03/2019.

RIBEIRO, V.A.L. Extração do urânio do colofanito via solventes orgânicos. 2007. 83f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Química Analítica do Instituto de Química – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROCHA, B.N. Estudo microclimático do ambiente de cavernas, Parque Estadual Intervales, SP. 2010. 110f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e ciências Humanas – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANTOS, T.O. Distribuição da concentração de Radônio em residências e outras construções da região metropolitana de Belo Horizonte. 2010. 146f. Dissertação (Mestrado em ciências e técnicas nucleares) – Departamento de Engenharia Nuclear – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

SANTOS, T.O. Radionuclídeos naturais em minas subterrâneas brasileiras. 2015. 143f. Tese (Doutorado em ciências e técnicas nucleares) – Departamento de Engenharia Nuclear – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA (SBE). Cadastro Nacional de Cavernas do Brasil. Disponível em <http://www.cavernas.org.br/cnc/About.aspx>. Acesso em: 06 mar. 2019.

TAHUATA, L. et al. Radioproteção e dosimetria: fundamentos. Rio de Janeiro, 2013. (Apostila).

TAKAHASHI. L.C. ET AL. Calibração de detectores SSNTD para medição de radônio. Annals of International Nuclear Atlantic Conference – INAC, Belo Horizonte, 2017.

TIBIRIÇA, L.G. Espeleologia e turismo: um longo caminho para conservação. Atelier Geográfico. Goiás, v.7, n.3, p. 134-148, dez. 2013.

UNSCEAR – UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. New York: Sources and effects of ionizing radiation – Official Records of the General Assembly, 63 session, n.46, vol I, 2010, 245p.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. A Citizen's guide to radon: the guide to protecting yourself and your Family from radon. Disponível em <https://www.epa.gov/radon/citizens-guide-radon-guide-protecting-yourself-and-your-family-radon>, 2016. Acesso em 12 fev. 2018.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. A Radon measurement in school. Disponível em

https://www.epa.gov/sites/production/files/201408/documents/radon_measurement_in_schools.pdf. Acesso em 27 mar. 2018.

VACONCELOS, D.C. Estudo da radioatividade natural das areias de praias do extremo sul da Bahia utilizando métodos de análises nucleares. 2010. 124f. Tese (Doutorado em ciências e técnicas nucleares) – Departamento de Engenharia Nuclear. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

WILKENING, M. Radon in the environment – Studies in environmental science 40. 1º Ed. Socorro: Elsevier. 137p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Radon and health: Information sheet. Disponível em: http://www.who.int/ionizing_radiation/env/Radon_Info_sheet.pdf. Acesso em 19/03/2018.

APÊNDICE A – Dados topográficos gruta Rei do Mato

Tabela A-1: Levantamento de dados topográficos na gruta Rei do Mato.

DADOS TOPOGRÁFICOS – GRUTA REI DO MATO				
DA BASE	ATÉ A BASE	DISTÂNCIA (m)	INCLINAÇÃO (°)	SSNTD
A0	A1	7,65	-1	-
A1	A2	4,10	0	-
A2	R1	5,02	+12	SIM
A2	A3	17,87	-2	-
A3	A4	11,79	-19	-
A4	A5	6,34	-38	-
A5	R2	8,92	-24	SIM
A5	A6	19,57	-27	-
A6	R3	23,11	-4	SIM
A6	A7	10,88	-36	-
A7	R4	4,47	+4	SIM
A7	A8	24,30	-10	-
A8	R5	10,18	-3	SIM
A8	A9	12,51	+11	-
A9	A10	8,43	-9	SIM
A10	A11	9,59	+15	-
A11	A12	14,69	0	-
A12	R6	5,00	-33	SIM

Fonte: o autor.

APÊNDICE B – Dados topográficos gruta de Maquiné

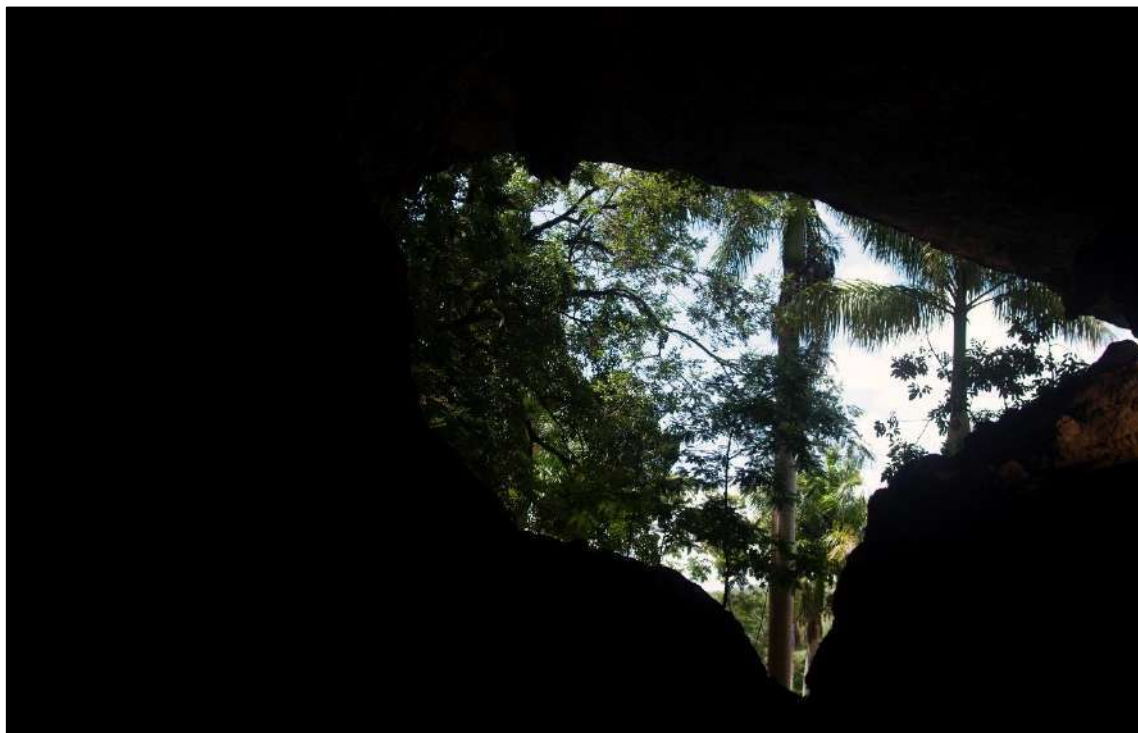
Tabela A-2: Levantamento de dados topográficos na gruta de Maquiné.

DADOS TOPOGRÁFICOS – GRUTA DE MAQUINÉ				
DA BASE	ATÉ A BASE	DISTÂNCIA (m)	INCLINAÇÃO (°)	SSNTD
A0	A1	8,85	-5	-
A1	A2	12,03	-2	-
A2	A3	6,71	+13	SIM
A3	A4	12,11	+3	-
A4	A5	3,16	+2	-
A5	R1	8,44	+1	SIM
A5	A6	22,23	-1	-
A6	A7	13,62	-27	-
A7	A8	9,45	-26	-
A8	A9	7,20	0	-
A9	A10	10,91	+1	-
A10	R2	15,99	+11	SIM
A10	A11	19,32	-2	SIM
A11	A12	24,50	+11	-
A12	A13	16,51	+6	-
A13	A14	4,66	-4	-
A14	R3	19,92	+6	SIM
A14	A15	38,43	-1	-
A15	A16	21,72	-4	-
A16	R4	10,78	+4	SIM
A16	B1	17,58	+5	-
B1	B2	9,92	+1	SIM
A16	A17	18,23	+3	-
A17	A18	11,96	0	-
A18	A19	27,16	-12	-
A19	A20	39,94	-3	-
A20	A21	27,43	+1	SIM
A21	A22	11,50	+12	SIM

Fonte: o autor.

APÊNDICE C – Imagens fotográficas: trabalho de campo

Figura A-1: Janela na entrada da gruta de Maquiné.



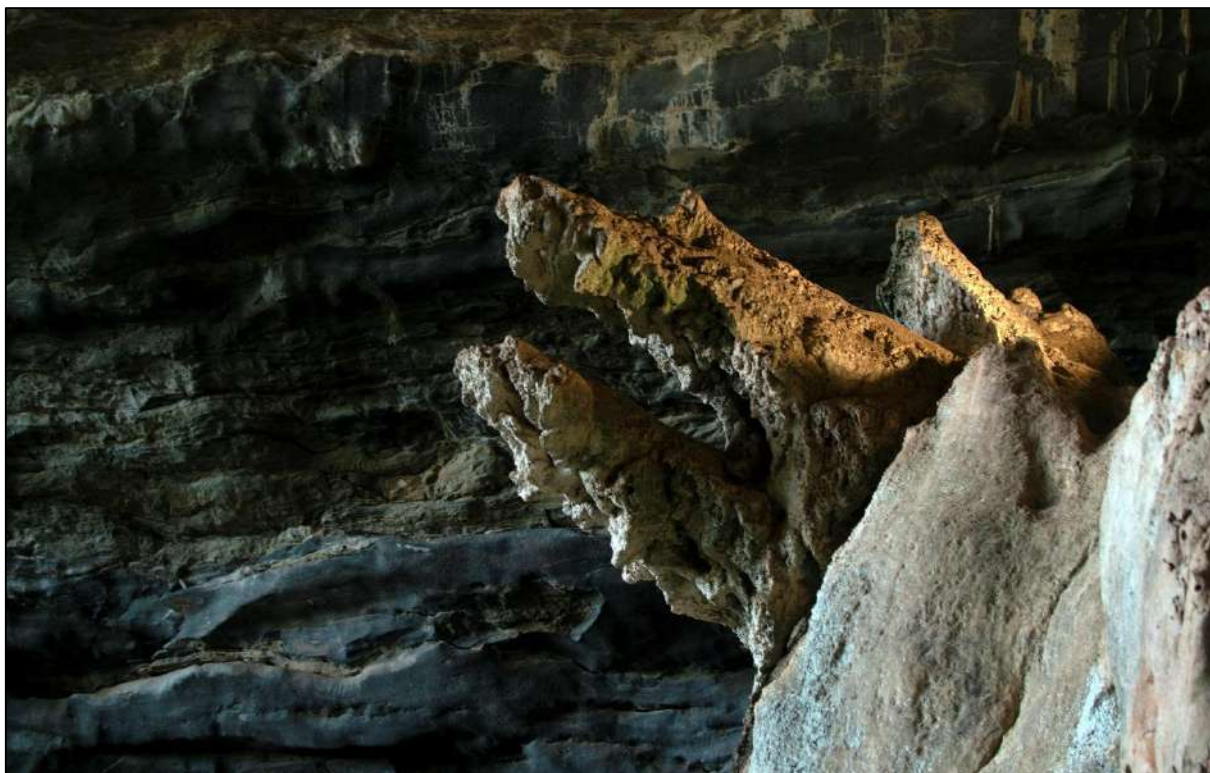
Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-2: Acesso a entrada principal da gruta de Maquiné.



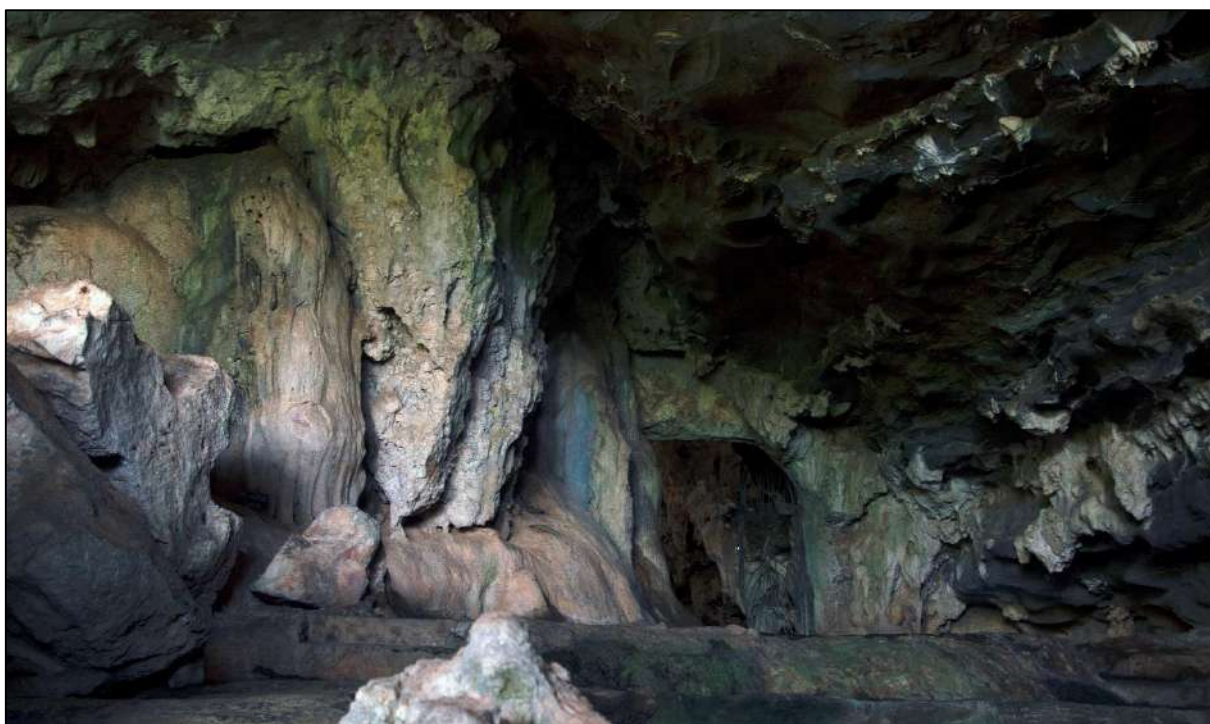
Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-3: Espeleotemas no interior da gruta de Maquiné.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-4: Portão de entrada - Gruta de Maquiné.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-5: Gerente da gruta Rei do Mato com a equipe de pesquisadores.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-6: Gerente da gruta Rei do Mato com a equipe de pesquisadores.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-7: Espeleotemas no interior da gruta Rei do Mato.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-8: Espeleotemas no interior da gruta Rei do Mato.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-9: Espeleotema em formação há 3000 anos na gruta Rei do Mato.



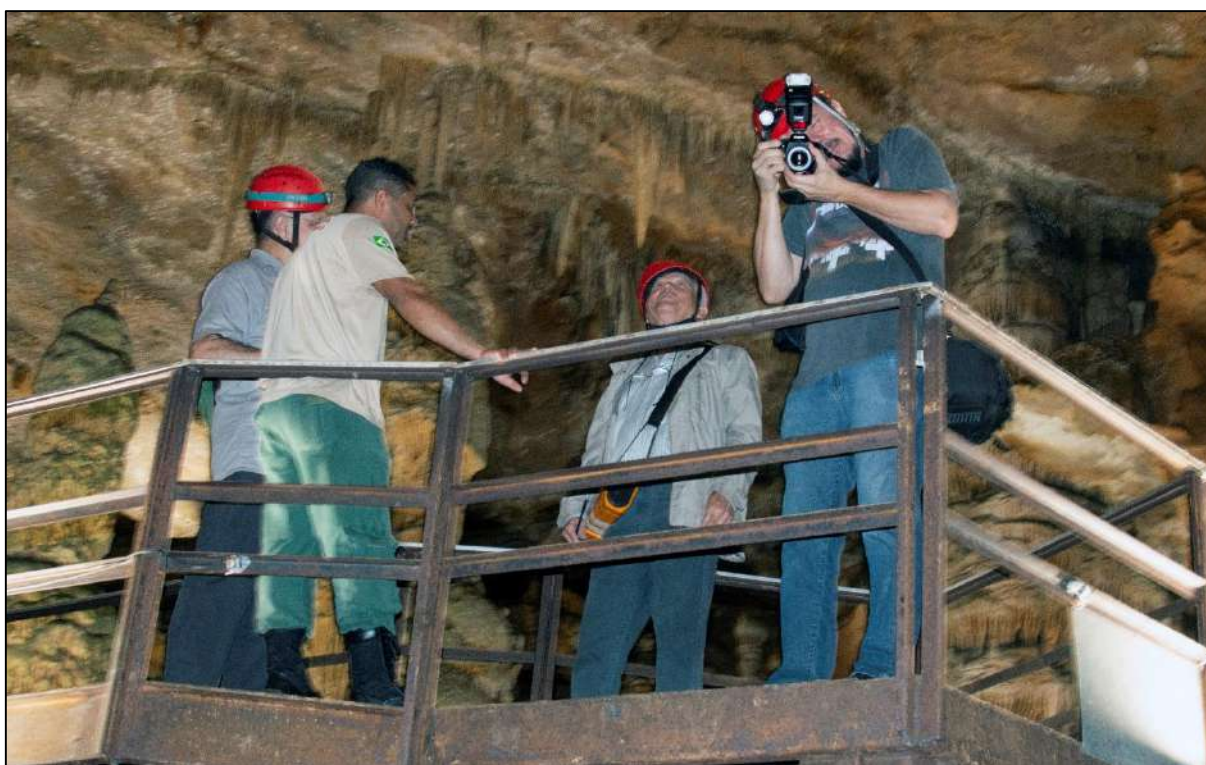
Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-10: Espeleotema conhecido como "O Papa" na gruta Rei do Mato.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-11: Grupo de pesquisa no interior da gruta Rei do Mato.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura A-12: Grupo de pesquisa no interior da gruta Rei do Mato.



Fonte: arquivo pessoal.