

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

ALINE CRISTINA MARTIN

**AVALIAÇÃO DA RADIOATIVIDADE NATURAL NA REGIÃO DO
MANANCIAL DA APA PASSAÚNA EM CAMPO LARGO/RMC**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2019

ALINE CRISTINA MARTIN

**AVALIAÇÃO DA RADIOATIVIDADE NATURAL NA REGIÃO DO
MANANCIAL DA APA PASSAÚNA EM CAMPO LARGO/RMC**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk

Coorientador: Profa. Dra. Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Martin, Aline Cristina

Avaliação da radioatividade natural na região do manancial da APA Passaúna em Campo Largo/RMC [recurso eletrônico] / Aline Cristina Martin. -- 2019.

1 arquivo eletrônico (71 f.) : PDF ; 2,80 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Engenharia Biomédica, Curitiba, 2019.

Bibliografia: f. 54-57.

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Área de Proteção Ambiental Estadual do Passaúna (PR). 3. Radioisótopos - Avaliação. 4. Radioatividade - Medição. 5. Radiação - Efeito fisiológico. 6. Rádion - Aspectos ambientais. 7. Espectrometria de raio gama. 8. Água - Qualidade. 9. Solo - Uso - Qualidade. 10. Proteção ambiental - Curitiba, Região Metropolitana de (PR). 11. Campo Largo (PR) - Área de Proteção Ambiental Estadual do Passaúna (PR). 12. Engenharia biomédica. I. Paschuk, Sergei Anatolyevich, orient. II. Corrêa, Janine Nicolosi, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 846

A Dissertação de Mestrado intitulada "**AVALIAÇÃO DA RADIOATIVIDADE NATURAL NA REGIÃO DO MANANCIAL DA APA PASSAÚNA EM CAMPO LARGO/RMC**" defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Aline Cristina Martin**, no dia **06 de novembro de 2019**, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração **Engenharia Biomédica**, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk - Presidente – (UTFPR)
Profa. Dra. Alessandra de Barros e Silva Bongioio - (UFPR)
Dr. Oderson Antônio de Souza Filho - (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 06 de novembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pelo dom da vida.

Ao CPGEI, pelo curso ofertado e pelo apoio a este trabalho.

À CAPES, pelo suporte financeiro em forma de bolsa de pesquisa.

Ao meu orientador professor Sergei Paschuk, pelo incentivo e suporte.

A professora Janine Corrêa, pela coorientação, paciência e tempo investido na correção deste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório pela amizade e por todas as contribuições.

À minha família por todo incentivo, carinho e suporte, principalmente ao meu pai pela incansável disposição em me acompanhar e auxiliar nas medidas de campo.

Ao Kaio, por todo carinho, incentivo e compreensão mesmo nos momentos mais difíceis.

E a todos que direta ou indiretamente tornaram a realização deste trabalho possível.

RESUMO

MARTIN, A. C. Avaliação da radioatividade natural na região do manancial da APA Passaúna em Campo Largo/RMC. 2019. 71 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A exposição à radiação natural está presente nos ambientes e há normas e regulamentações que limitam concentração e dose relativas. O rádio é encontrado em rochas, solo, água e minerais, sendo um elemento importante relacionado à exposição humana. O radônio se apresenta na forma gasosa, possuindo assim maior mobilidade. Há uma relação importante entre a exposição ao radônio e o câncer de pulmão, sendo que o radônio é considerado a segunda causa deste tipo de câncer. As doses relativas à radiação gama também contribuem para a exposição à radiação, mas no Brasil não existem normas específicas que regulamentem os limites de exposição à radiação gama natural. O objetivo desta pesquisa é avaliar a radioatividade natural na região do manancial da APA Passaúna em Campo Largo/RMC, por meio da verificação das concentrações de rádio e radônio em águas e solo da região e das doses relativas à radiação gama natural presentes na interface solo atmosfera na região. Foram feitas medições gama ambiental na região, bem como foi feito o monitoramento de radônio e rádio em águas e solo. Devido à meia-vida de 1600 anos do rádio, o equilíbrio secular entre este isótopo e o radônio foi utilizado para determinação de concentração de rádio nas amostras de água. Os valores mais expressivos dos espectros das medições gama foram utilizados como direcionadores das áreas de interesse em monitoramento de rádio e radônio. Os resultados das medidas de espectrometria gama ambiental da região indicaram valores que ficaram na faixa de 0,052 até 0,204 $\mu\text{Sv/h}$, os quais estão abaixo do limite para a população em geral, de 10 mSv/a, inclusive se considerados os erros correlatos. Os valores de concentração de radônio nas amostras de água de poço foram de $6,16 \pm 0,06$ e de $2,18 \pm 0,03$ Bq/L, valores que estão acima do limite estabelecido de 0,5 Bq/L, porém após atingir o de equilíbrio secular seus valores foram de $0,16 \pm 0,02$ e $0,23 \pm 0,02$ Bq/L, ambas dentro dos limites. Tanto as amostras retiradas da represa do Passaúna, quanto as amostras dos lagos secundários analisados apresentam valores de concentração de rádio dentro dos limites, $0,395 \pm 0,031$ Bq/L; $0,220 \pm 0,046$ e $0,234 \pm 0,020$, respectivamente. A concentração de Rn no solo variou de 9.200 ± 800 à 112.000 ± 14.000 Bq/m³. Os resultados mostraram que não há uma relação clara entre os valores mais altos de dose com os valores mais altos da concentração de rádio e radônio. A pesquisa desenvolvida serve como referência na contribuição com dados sobre a radioatividade natural.

Palavras chaves: Radioatividade natural. Radônio. Espectrometria gama. APA Passaúna.

ABSTRACT

Exposure to natural radiation is present in environments and there are regulations that limit relative concentration and dose. Radium is present in rocks, soil, water and minerals and is an important element related to human exposure. Radon is in gaseous form, thus having greater mobility. There is an important relationship between radon exposure and lung cancer, and radon is considered the second cause of this cancer. Gamma radiation dose also contribute to radiation exposure, but there are no specific regulamentation governing exposure limits for natural gamma radiation in Brazil. The objective of this research is to evaluate the natural radioactivity in the region of the APA Passaúna spring in Campo Largo / RMC, by measuring the radium and radon concentration in water and soil of the region and the dose related to the natural gamma radiation present at the soil interface atmosphere in the area. Environmental gamma measurements were made in the region, as well as radon and radium monitoring in water and soil. Due to the 1600-year half-life of radium, the secular equilibrium between this isotope and radon was used to determine radium concentration in water samples. The most significant values of the gamma measurement spectrum were used to focus to the areas of interest in radium and radon monitoring. The results of the environmental gamma spectrometry measurements indicated values that ranged from 0.052 to 0.204 $\mu\text{Sv/h}$, which are below the general population limit of 10 mSv/y, even considering the correlated errors. Radon concentration values in well water samples were 6.16 ± 0.06 and 2.18 ± 0.03 Bq/L, values that are above of the established limit of 0.5 Bq/L, but after reaching the secular equilibrium their values were 0.16 ± 0.02 and 0.23 ± 0.02 Bq/L, both within the limits. Both samples taken from the Passaúna dam and samples from secondary lakes analyzed present radium concentration values within the range, 0.395 ± 0.031 Bq/L; 0.220 ± 0.046 and 0.234 ± 0.020 ; respectively. The concentration of Rn in the soil ranged from $9,200 \pm 800$ to $112,000 \pm 14,000$ Bq/m³. The results evidenciate that there is no clear relationship between the highest dose values and the highest radon and radon concentration values. The research developed serves as a reference in contributing with data on natural radioactivity.

Key words: Natural radioactivity. Radon. Gamma spectrometry. APA Passaúna.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - APAs da RMC. APA do Passaúna destacada.	17
Figura 2 - Variação da utilização do solo entre 2012 e 2014 no Brasil.	19
Figura 3 – Percentual de exposição humana proveniente de diferentes fontes naturais e artificiais - 2008	24
Figura 4 – Percentual de exposição humana proveniente de diferentes fontes naturais e artificiais - 2000	24
Figura 5– Série de decaimento Th-232	25
Figura 6 - Serie de decaimento U-238	26
Figura 7 - Serie de decaimento U-238	26
Figura 8 - Processo de exalação e de emanação	29
Figura 9 – Gráfico que mostra a atividade do elemento pai e a atividade do elemento filho em relação ao tempo de meia-vida	30
Figura 10 - Mapa da região do Passaúna com pontos de medição de rádio/radônio	34
Figura 11 – Espectrômetro gama portátil pertencente ao DACOC/ UTFPR. A) mochila para transporte do equipamento; B e C) detectores	35
Figura 12 - Palm top utilizado para realizar a interface entre detector e usuário	36
Figura 13 - Software utilizado para baixar e analisar os dados.	37
Figura 14 - Esquema do arranjo AquaKIT	38
Figura 15 - Arranjo utilizado para medida de solo	39
Figura 16 - Arranjo para medida de solo. A) sonda inserida à 95 cm de profundidade; B) equipamento AlphaGuard; C) Bomba; D) Rotâmetro	43
Figura 17 - Mapeamento dos valores de dose fornecidos pela espectroscopia gama	45
Figura 18 - Espectro total das medidas gama da região do Passaúna	46
Figura 19 - Gráfico relacionando os dados de localização e os valores de taxa de dose fornecidos pelas medidas de espectroscopia gama	47
Figura 20 - Curva de decaimento em Bq/L referente a amostra do poço Pc	49
Figura 21 - Curva de decaimento de radônio em Bq/L referente a amostra do poço Pt	49

Lista de Tabelas

Tabela 1 - O intervalo entre as medidas	40
Tabela 2 - Resultado das medições de concentração de radônio em água de poço	48
Tabela 3 - Resultado das medidas de radônio/rádio das amostras coletadas na represa do Passaúna	50
Tabela 4 - Resultado das medidas de radônio/rádio das amostras coletadas nos lagos secundários da região	51
Tabela 5 - Resultados das medidas de radônio no solo	52

Sumário

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 USO DO SOLO	18
2.2 INFLUÊNCIA DO SOLO NA QUALIDADE DE ÁGUA	20
2.3 USO DA ÁGUA	21
2.4 RADIOATIVIDADE NATURAL	23
2.4.1 Radiação Gama Natural	27
2.4.2 Rádio	28
2.4.3 Radônio	28
3 METODOLOGIA	33
3.1 ESPECTROMETRIA GAMA AMBIENTAL	35
3.2 MEDIDAS DE RÁDIO E RADÔNIO AMBIENTAL	37
3.2.1 Medidas de Rádio e Radônio em Águas	39
3.2.2 Medidas de Rádio e Radônio em Solo	42
4 RESULTADOS	45
4.1 ESPECTROMETRIA GAMA AMBIENTAL	45
4.2 MEDIDAS DE ÁGUA DE POÇO	48
4.3 MEDIDAS DE ÁGUA DE LAGO	50
4.4 MEDIDAS DE SOLO	51
5. CONCLUSÕES	53

REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICE A – Lista de medidas.....	58
APÊNDICE B - Espectro das medidas gama da região do Passaúna	59

1 INTRODUÇÃO

A radioatividade presente na crosta terrestre tem origem predominantemente natural, todavia, há uma parcela advinda de fontes artificiais. A radioatividade natural é proveniente principalmente de raios cósmicos e de emissões relativas a decaimentos de radionuclídeos naturais. A exposição à radiação ionizante advinda de fontes artificiais contempla, além dos radionuclídeos da medicina nuclear e dos produtos de consumo, as partículas radioativas *fallout*, bem como os raios X médicos e a exposição ocupacional (NCRP,2009).

Os raios cósmicos são feixes altamente energéticos oriundos do espaço. Esses raios podem ser classificados de acordo com a sua energia, tipo ou origem. Os três principais tipos são: radiação cósmica galáctica, radiação galáctica solar e radiação proveniente do cinturão de Van Allen. Já os radionuclídeos naturais são elementos instáveis presentes na crosta terrestre. As séries radioativas naturais do urânio U-238, do actínio U-235 e do tório Th-232, denominados elementos-pai dessas séries, têm nas emissões dos elementos-filho a principal contribuição para a radioatividade natural. O potássio K-40 também é um importante radionuclídeo natural, embora não faça parte das mencionadas séries radioativas. Estes elementos estão em estado instável, e passam por decaimento radioativo tendendo a um estado mais estável, gerando uma série de elementos instáveis, até atingir a estabilidade representada pelo elemento chumbo. No caso do potássio 40, seu decaimento imediato para cálcio e argônio, elementos estáveis, não gera uma série propriamente dita, embora seja ressaltada a importância do K-40 na dose aos seres humanos (UNSCEAR, 2008).

Os radionuclídeos usados na medicina nuclear e os produtos de consumo que contribuem para a exposição humana são, na sua grande maioria, produzidos artificialmente em reatores nucleares. Há uma parcela de radionuclídeos, denominados *fallout* que são os elementos radioativos carregadas para a atmosfera após acidentes ou explosões nucleares (NCRP, 2009). As situações mencionadas são exemplos de radionuclídeos artificiais, mencionados no início da introdução deste trabalho.

Exposições médicas compreendem os procedimentos como exames e tratamentos realizados durante a vida do paciente, que utilizam algum tipo de radiação ionizante e a exposição ocupacional está relacionada à dose relativa à radiação

ionizante no local de trabalho (UNSCEAR,2008). Uma parte da exposição está relacionada a emissões relativas a radionuclídeo utilizados em medicina nuclear. Mas uma parte bastante significativa da exposição se deve aos raios X médicos – e com alguma contribuição os raios X industriais - que não se enquadram na questão da radioatividade, mas devido ao fato de provocarem ionização nos tecidos, portanto categorizados como radiação ionizante, fazem parte do escopo de estudos relacionados a doses em seres humanos.

Átomos instáveis passam por decaimento para atingirem um estado mais estável. Existem três formas principais de decaimento: emissões alfa, beta e gama. O decaimento alfa (α) ocorre em núcleos pesados que emitem dois prótons e dois nêutrons (núcleo do elemento hélio). O decaimento beta ocorre em átomos que tem excesso de prótons ou de nêutrons. Esta emissão é representada por elétrons (β^-) ou pósitrons (β^+) (TURNER, 2007).

Em caso de decaimento gama (γ), o mesmo ocorre normalmente associado a emissões alfa e beta, por exemplo, quando o núcleo passa pelo decaimento e fica em estado excitado emitindo um raio gama para retornar ao estado fundamental. As emissões são características para cada elemento no sentido de que dependem do tipo e da energia de cada. Por meio de identificação da energia relacionada às emissões é possível determinar quais os radionuclídeos presentes em uma amostra. (TURNER, 2007). Em geral, as emissões não ocorrem de forma isolada, embora isto possa acontecer eventualmente. Ou seja, decaimentos alfa e beta podem ser acompanhados de emissões gama.

A exposição à radiação natural é inevitável, já que está presente em qualquer ambiente, mas é possível tecer circunstâncias no intuito de diminuir a exposição do ser humano. Neste sentido, há normas e regulamentações estabelecidas por órgãos especializados que limitam concentrações e/ou doses relativas. No Brasil a norma regulamentadora 3.01/007 de 2005 da CNEN estabelece uma dose anual genérica de 10 mSv como valor de referência para intervenção no caso de uma exposição crônica a radiação natural (CNEN, 2005). No entanto não existem normas específicas que regulamentem os limites de exposição à radiação gama natural. Já com relação a atividade de radionuclídeos em água o Ministério da Saúde brasileiro, na Portaria nº 2914 de 2011 (BRASIL,2006), determina que os valores de atividade alfa total de uma

amostra não deveriam exceder 0,5 Bq/L, mesmo valor recomendado pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2004).

Presente na natureza em concentrações médias no solo que variam de 67 a 17 Bq/kg, o rádio é um elemento radioativo presente nas séries naturais de decaimento do urânio e do tório (IAEA, 2014). O rádio possui meia-vida de aproximadamente 1600 anos e pode ser encontrado em rochas, solo, água e minerais, sendo um elemento importante relacionado à exposição humana relativa às radiações ionizantes. Este radionuclídeo decai principalmente por meio de emissão alfa originando elemento radônio, também radioativo (EISENBUD e GESSELL, 1997).

Dentre os radionuclídeos presentes na crosta terrestre o radônio exige uma atenção especial por ser um elemento radioativo que se apresenta na forma gasosa, possuindo assim maior mobilidade, chegando com mais facilidade à atmosfera. O radônio é um gás nobre incolor, inodoro e insípido e quando inalado, ao sofrer decaimento, seus filhos de meia-vida curta, por serem metais, se aderem ao tecido pulmonar. Os filhos do radônio também são radionuclídeos, pertencentes às séries radioativas naturais, e quando decaem a energia emitida é depositada em uma determinada região/espessura do tecido pulmonar (TURNER, 2007). Há uma relação importante entre a exposição ao radônio e o câncer de pulmão, sendo que o radônio é considerado a segunda causa deste tipo de câncer (WHO, 2009; UNSEAR, 2006).

O radônio é o principal responsável pela dose aos seres humanos. Dependendo da região pode contribuir com mais de 50% da dose. As normas relativas aos ambientes internos (*indoor*) são baseadas na concentração de radônio no ar (WHO, 2009; ICRP, 2014).

No entanto, embora o enfoque central da discussão seja o radônio, inclusive com normas bem estabelecidas sobre a concentração do mesmo no ar, como mencionado, observa-se que os filhos de meia-vida curta do radônio têm influência expressiva na dose. Neste sentido, quando se limita a concentração de radônio no ar, a contribuição dos filhos faz parte intrínseca desta limitação. Com relação aos limites em águas, solos e materiais de construção, as normas, em geral, se restringem às concentrações de rádio (elemento pai ou precursor do radônio). É interessante ressaltar que, embora a correlação em termos de saúde seja voltada ao radônio, o elemento rádio (pai) é a base para limites quando se trata de águas (indiretamente

por atividade alfa global), solo e materiais de construção (UNSCEAR, 2008; BRASIL, 2011).

O radônio (gás) presente em ambientes é exalado do solo, de águas e de materiais de construção. Desta forma, há evidente necessidade de medições de radônio em ambientes, solos, águas e materiais incentivadas por programas nacionais e internacionais, e conseqüentemente, caracterização de solos, águas e materiais quanto à concentração de rádio nos mesmos.

O Projeto de Risco de Radônio para o Brasil foi proposto pelo Centro de Desenvolvimento Tecnológico/Serviço Geológico do Brasil com cooperação de pesquisadores de diversas instituições. O projeto tem como objetivo o levantamento de dados com relação a presença de radionuclídeos naturais e sua relevância nos casos de neoplasias pulmonares. Durante o projeto serão realizadas medições de gamaespectrométricas e medições de radônio *in loco*. Desta forma, há interesse em se conhecer as concentrações de radônio e rádio, especificamente neste trabalho em águas e solo, de mananciais da RMC.

O Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR (LFNA) se especializou em medições de radônio e rádio desde 2003, tem equipamentos e equipe voltados às pesquisas relacionadas, possibilitando a correlação entre o interesse científico sobre o assunto relatado e a possibilidade técnica desta pesquisa.

A Área de Proteção Ambiental do Passaúna (APA) é de especial interesse, tendo em vista que possui um manancial responsável pelo abastecimento de aproximadamente 19% de Curitiba sua região metropolitana. Há restrições ambientais na APA do Passaúna devidas ao fato de ser área protegida. Inclusive com relação a ocupação do solo. Todavia, a quantidade de habitantes aumentou consideravelmente nos últimos anos. Acredita-se que isto constrói a hipótese da necessidade de análise com relação a concentração de radionuclídeos naturais na região (PMC, 2017).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a radioatividade natural na região do manancial da APA Passaúna em Campo Largo/RMC.

1.1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Verificar as concentrações de Ra da água do lago na região do manancial Passaúna;
- Avaliar a concentração de Rn e Ra de águas de poços na região do manancial Passaúna;
- Avaliar a concentração de Rn do solo do entorno dos poços monitorados na região do manancial Passaúna;
- Comparar os resultados obtidos das concentrações de Rn e Ra com os limites estabelecidos pelas normas e recomendações nacionais e internacionais;
- Analisar as doses relativas à radiação gama natural presente na interface solo atmosfera na região do manancial Passaúna;
- Contribuir com a CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear e com o projeto Programa de Risco de Radônio para o Brasil, realizado em cooperação com o NIT/CEDES – Centro de Desenvolvimento Tecnológico / Serviço Geológico do Brasil.

1.2 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que a ocupação e uso do solo em regiões de mananciais é restrita com o intuito de preservar o ambiente e principalmente preservar a qualidade da água, há interesse justificável em pesquisa que contribua no conhecimento da qualidade das águas de poços, lagos e dos solos dessas regiões. Este interesse é fortalecido pelo fato de que, mesmo com ocupação do solo controlada, há características referentes principalmente à concentração de radionuclídeos naturais, que estabelecem condições de exposição relacionadas à composição dos solos e água.

O controle da ocupação do solo em mananciais está voltado às questões de qualidade da água fornecida à população. Todavia, este controle não garante, por si só, a qualidade do solo ou da água, devido a fatores relacionados às características naturais do solo / água da região. Há condições de uso anteriores que podem ter

contaminado o ambiente ou mesmo algum fator contaminante não conhecido que pode influenciar nesta questão.

Neste sentido, há três situações correlatas: a inevitável exposição humana advinda dos radionuclídeos naturais da região, a possível exposição relacionada aos materiais depositados pela ação humana e os passivos radioativos gerados também pela ação humana. Em todos os casos, tanto o ambiente quanto a água disponibilizada para a população que faz uso desse manancial requer monitoramento quanto às suas características que geram exposição.

Esta pesquisa se baseia em uma pergunta fundamental: o ambiente protegido como manancial realmente tem características ambientais, em termos de concentração de radionuclídeos, que permitem seu uso sem restrições?

A partir deste questionamento, um estudo de caso voltado a medições de radiação gama bem como radônio e rádio, que são os principais radionuclídeos que influenciam na exposição humana em ambientes e a avaliação das concentrações destes elementos tendo como referência as normas e regulamentações pertinentes é de extrema importância e justifica esta pesquisa.

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO

Radionuclídeos naturais são as principais fontes que contribuem para a exposição à radiação. Por mais que se entenda ser impraticável bloquear completamente essa exposição é necessário um monitoramento das concentrações relativas aos principais radionuclídeos, que em última instância são relacionados com a dose em seres humanos. O controle dos níveis acontece de forma que, quando necessário e/ou possível sejam realizadas intervenções com o objetivo de manter a exposição dentro dos limites estabelecidos.

A região do Passaúna, no entorno do rio de mesmo nome, além de ter passado por um aumento populacional nos últimos anos, é o local onde se encontra o manancial que abastece aproximadamente 19% de Curitiba e Região Metropolitana (RMC) no estado do Paraná.

A qualidade da água e do solo é de interesse dos órgãos responsáveis pelo manancial que devem garantir à população da RMC o fornecimento de água de acordo

com os parâmetros físicos e químicos normatizados e à população local, também informações sobre as características correlatas ao solo da região.

A associação entre a exposição humana às radiações e a saúde, com foco em emissões alfa e gama, está dentro do escopo do assunto mencionado e os radionuclídeos naturais rádio e radônio são elementos de interesse em termos de saúde humana.

Neste contexto observa-se a relevância da região do Passaúna para a RMC e ressalta-se a necessidade de análise cuidadosa do ambiente, solo e da água com relação à radiação gama e aos radionuclídeos presentes que podem causar efeitos deletérios à saúde.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A Pesquisa foi realizada na Área de Proteção Ambiental (APA) do Passaúna, no estado do Paraná, em área que compreende os municípios de Curitiba, Campo Largo, Araucária e Almirante Tamandaré. As medições tiveram como foco principal a parte da APA do Passaúna situada na região de Campo Largo. Foram coletadas amostras de águas (lagos, principal e secundário) e águas de poços da região do manancial. As medições de solo foram feitas em locais correlatos às amostras de água em estudo. A localização das medidas está listada no Apêndice A. Foram realizadas também medidas de espectrometria gama na região.

As medidas de radônio e rádio foram realizadas no segundo semestre de 2018. A tomada de dados relativa à radiação gama estendeu-se ao primeiro semestre de 2019. Depois de coletadas as amostras foram analisadas no laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A análise dos dados decorreu durante os dois semestres mencionados.

Os equipamentos e as instalações utilizados para análise dos materiais (água e solo) bem como os equipamentos relativos às medições da radiação gama foram disponibilizados pelo grupo de pesquisa de radônio do LFNA / UTFPR que está instrumentado e capacitado para este tipo de pesquisa.

A pesquisa foi feita com base em técnicas de medições, calibrações, intercomparações e análises feitas dentro da cooperação institucional entre UTFPR e CDTN/CNEN.

Considerando que o manancial Passaúna é responsável pelo abastecimento de aproximadamente 19% da população de Curitiba e Região Metropolitana, como já mencionado, infere-se que as medições propostas e delimitadas neste tópico são importantes tendo em vista a necessidade de um maior número de dados com relação à radiação gama local e às concentrações de radônio, rádio nesta região ressaltando a importância de eventuais pesquisas não apenas na RMC, mas em todo o país.

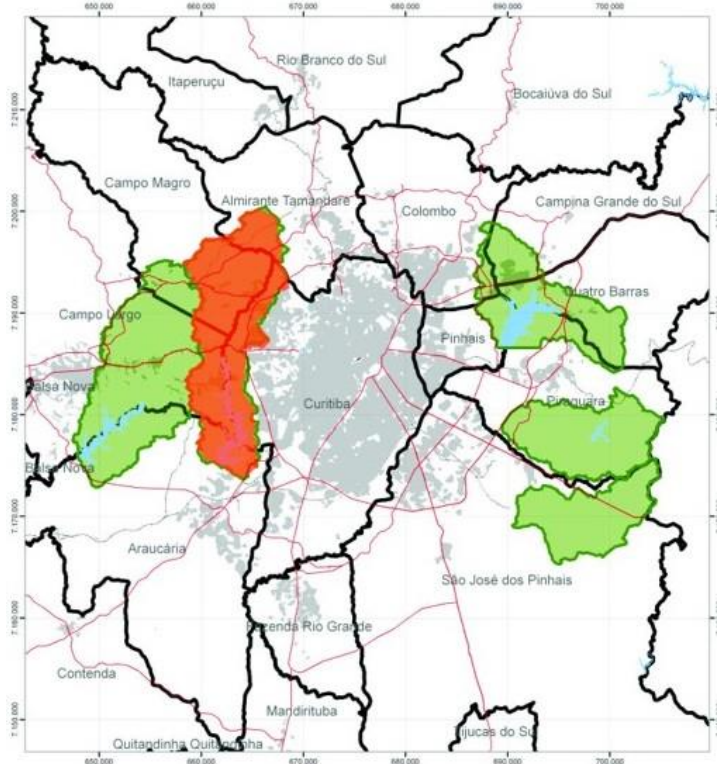
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 APA

Tendo em vista os impactos que podem ser gerados devido ao uso do solo existe uma necessidade de proteção de recursos naturais. Para isso há uma formalização com relação às regiões que precisam de restrição com relação à sua ocupação e uso, Brasil são chamadas de Áreas de Proteção Ambiental (APAs).

As Áreas de Proteção Ambiental têm sua criação prevista na lei 9.985 de 2000 (BRASIL, 2000) que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação. Essas áreas têm como objetivo conciliar o avanço econômico com a proteção ambiental. No estado do Paraná existem 68 Unidades de Conservação, sendo que 5 delas ficam na Região Metropolitana de Curitiba (RMC). O posicionamento geográfico das APAs da RMC pode ser visualizado na Figura 1 (IAP, 2012).

Figura 1 - APAs da RMC. APA do Passaúna destacada.



Fonte: COMEC (2010)

Observa-se que a APA do Passaúna, junto com a APA do Verde, destacadas em laranja na imagem, possuem uma área de aproximadamente 308 km². As regiões mais escuras (Fig. 1), observadas dentro das áreas de proteção, representam a mancha urbana. Há uma ordem de grandeza similar clara entre a área física das APAs e urbana na RMC.

O reservatório do Passaúna é uma importante fonte de captação de água. A utilização das águas superficiais possui algumas vantagens, principalmente relacionadas com a facilidade de coleta. Por outro lado, essas águas estão mais suscetíveis a contaminações, poluição e atuação de agentes patogênicos.

Neste sentido, o uso do solo e da água, as inter-relações são importantes e são necessários estudos sobre os radionuclídeos naturais e a comparação com os limites estabelecidos em relação às concentrações admissíveis dos isótopos de áreas onde há atividades humanas.

2.1 USO DO SOLO

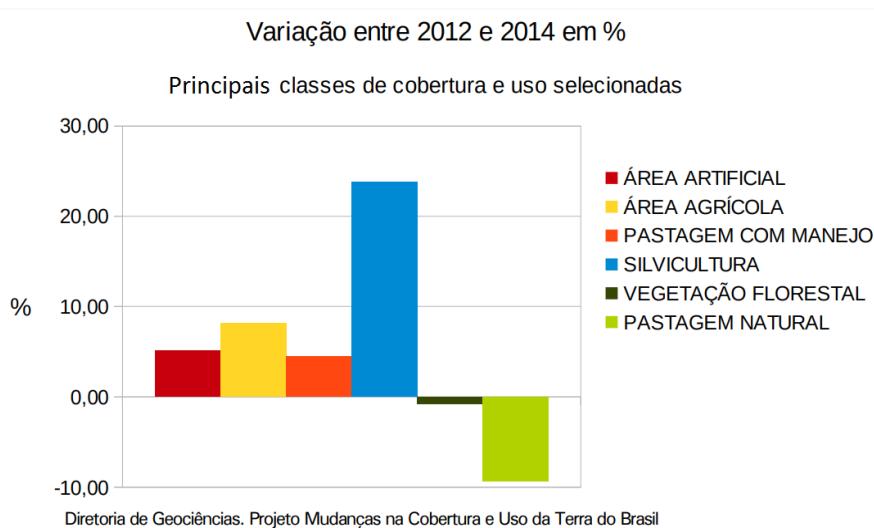
O solo é um elemento essencial para as atividades humanas, tanto no que concerne questões de moradia, implantação de indústrias e de obras de infraestrutura, como no uso para extração mineral, produção de alimentos, pecuária, dentre outros. Os diferentes usos do solo o que geram alterações ambientais diversas que podem, dependendo da situação, causar impacto significativo (SCANLON et al., 2007; PEREIRA, 2012).

As questões ambientais estão relacionadas à utilização não planejada e excessiva do solo. O avanço da área agrícola, por exemplo, pode diminuir a fauna e da flora da região, na contaminação da área por meio de fertilizantes e também deixar o solo suscetível à erosão, compactação e a redução da sua fertilidade (DIAS, 1999).

Dados do IBGE (2017) mostram que entre os anos de 2012 e 2014 no Brasil houve um aumento de 5,1% nas chamadas áreas artificiais. O IBGE define áreas artificiais como aquelas caracterizadas pelo uso urbano.

No mesmo período, houve também, segundo o mesmo documento, um aumento de 8,2% nas áreas utilizadas para a agricultura, como pode ser visto nos dados relativos à variação de utilização do solo, Figura 2 (IBGE, 2017)

Figura 2 - Variação da utilização do solo entre 2012 e 2014 no Brasil.



Fonte: IBGE, 2017.

Com relação à Figura 2, observa-se, que além do aumento das áreas artificiais e agricultura, há também aumento expressivo relacionado à silvicultura (mais de 20%) e a diminuição correlata da vegetação florestal e das pastagens naturais. É evidente que as mudanças observadas impactam a distribuição da população e consequentemente no uso do solo.

Na região do Passaúna, situada em Campo Largo, entre os anos de 2000 e 2010, a população aumentou de 53.659 para 67.019 habitantes (COMEC, 2012). Ou seja, há um aumento de mais de 10% em dez anos, aumento este que pode impactar uso do solo e consequentemente na qualidade da água da região, o que será exposto a seguir, em tópico específico.

O aumento da população e a inerente alteração na forma como o solo é utilizado, mencionados, trazem consigo preocupações com as consequências sobre a saúde dos moradores, tanto com relação aos riscos relacionados tanto a agentes biológicos quanto químicos e físicos. Esta preocupação pode ser entendida como ações públicas relacionadas a programas de monitoramento e controle dos parâmetros de interesse, bem como trabalhos de interesse científico correlato.

A região no entorno do manancial do Passaúna possui diferentes tipos de solo, entre eles Gleissolo, Latossolo e Argissolo (. BHERING, S. B.; SANTOS, H. G., 2008). A análise da radioatividade natural presente no solo é de interesse pelo fato de impactar na saúde humana (EPA, 2016) e faz parte da preocupação mencionada. Há o interesse evidenciado em trabalhos como os de Neznal (1996;2005) na República

Tcheca em países onde há normas e regulamentações específicas e de Corrêa (2011) no Brasil, onde as normas e/ou regulamentações limitam-se à norma da CNEN (2011).

A presença de radionuclídeos no solo está relacionada à radioatividade natural nos vários ambientes da Terra. Dentre esses radionuclídeos é importante ressaltar o U-238 e o Th-232, principais elementos pai das séries radioativas naturais. Estes radionuclídeos estão presentes no solo e água, conjuntamente com seus filhos, rádio e radônio e outras progênies (UNSCEAR, 2008).

O radônio, por ser o único radionuclídeo das séries naturais a se apresentar no estado gasoso, possui maior mobilidade, exalando do solo para água e para o ar. Este radionuclídeo e seus filhos podem contribuir para a formação de neoplasias pulmonares (UNSCEAR, 2000).

Depreende-se do exposto neste item que parâmetros naturais devem ser avaliados e monitorados para contribuir na gestão da qualidade do solo.

2.2 INFLUÊNCIA DO SOLO NA QUALIDADE DE ÁGUA

Os fenômenos de transporte físicos associados às reações químicas e efeitos biológicos decorrentes são evidentes nas inter-relações entre solo, água e atmosfera. No trabalho de Scanlon et al. (2007), os autores mostram uma correlação efetiva entre a utilização do solo e a qualidade da água que está nas proximidades já que existem diferentes mecanismos que levam à deposição do solo na água.

Uma das principais formas de deposição de solo na água, bastante estudada e estabelecida é o assoreamento. O assoreamento é o acúmulo de solo em um corpo d'água diminuindo sua profundidade e seu volume. Esse processo pode ser causado de forma natural, mas é agravada devido a abertura de loteamentos, construção de rodovias e exposição do solo em áreas agrícolas e áreas de mineração (DIAS, 1999).

Particularmente, o solo exposto é carregado devido às chuvas por meio das águas de escoamento, para o corpo de água mais próximo. O assoreamento ocorre principalmente associado aos grandes centros urbanos, devido ao grande acúmulo populacional e concomitante uso do solo, o que influencia nos processos de erosão (DIAS, 1999).

Embora os radionuclídeos comumente presentes nos corpos d'água sejam provenientes das séries radioativas naturais, e, portanto, não dependerem

exclusivamente do uso comum do solo, há passivos radioativos relacionados ao minério de urânio e tório cuja deposição e/ou assoreamento, podem influenciar na qualidade da água neste quesito.

Os fertilizantes fosfatados são largamente utilizados na agricultura. Esse tipo de fertilizante é produzido a partir de rochas fosfáticas, naturalmente ricas em radionuclídeos da série do urânio e do tório, além do potássio. A utilização destes fertilizantes nas plantações aumenta a radioatividade do solo (UNSCEAR, 2008).

É também importante ressaltar que o aumento populacional aumenta a demanda por alimentos, obviamente, o que influencia na produção e consequente aumento no consumo de agrotóxicos e fertilizantes. (DIAS, 1999).

No quesito uso do solo e qualidade da água o saneamento é fundamental. Todavia, a relação entre radionuclídeos e o saneamento (esgotos sanitários) é de menor interesse já que os dejetos humanos que carregam radionuclídeos advêm quase que exclusivamente do uso de radiofármacos e sua quantidade é pouco expressiva.

2.3 USO DA ÁGUA

As águas utilizadas para o consumo humano são captadas de mananciais superficiais ou de águas subterrâneas. Mananciais são fontes de água doce que podem ser superficiais ou subterrâneas, utilizadas para consumo humano ou desenvolvimento de atividades econômicas. Essas áreas de manancial, em geral localizadas em APAs, devem ser alvo de atenção específica, tendo em vista sua importância, contemplando aspectos legais e gerenciais (CONEJO, 2007)

Na definição da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), água subterrânea é toda água que ocorre de baixo da superfície do solo. A quantidade de água subterrânea do planeta pode chegar até 60 milhões de km³, porém, questões técnicas limitam a captação apenas às águas que estão até 4000 m de profundidade. Sendo assim, desse volume apenas cerca de 8 a 10 milhões de km³ podem ser utilizados. No Brasil, as reservas de água subterrânea são estimadas em 112.000 km³ (ABAS, 2017)

A água subterrânea é formada pela combinação da composição química da água que penetra o solo e da composição das rochas que a água atravessa em seu

caminho até o ponto de interesse. As águas subterrâneas possuem vantagens em relação as águas de rio (superfície), no que se refere ao consumo. Dentre essas vantagens está o fato de serem naturalmente filtradas e purificadas dispensando, em muitas situações, tratamentos, sofrem menos influência nas variações climáticas. Por não estarem diretamente ligada à área superficial, estão mais protegidas de agentes poluentes (ABAS, 2017).

As águas subterrâneas também têm vantagem técnica expressiva, pois o local de captação da água (poço) poder ser próximo do local de utilização, o que propicia menor gasto com infraestrutura para transporte e utilização (BRASIL, 2006).

O trabalho de Corrêa (2011) aponta que as águas subterrâneas possuem uma radioatividade significativa, por causa do tempo contato com as rochas e solo, o que provoca uma diluição dos elementos e radionuclídeos. Neste trabalho foram encontrados valores de concentração de radônio em águas subterrâneas entre 215 e 1,60 Bq/L.

Tanto as águas subterrâneas quanto as superficiais sofrem influência dos radionuclídeos presentes no solo da região. Todavia o mesmo trabalho de Corrêa (2011) constata a evidência de que águas subterrâneas, quando passam a ser águas de superfície, tem a concentração de radônio diminuídas.

Qualidade da água

A qualidade da água está relacionada com a qualidade a saúde de uma população, tendo em vista que é um elemento fundamental para a manutenção da vida.

O documento da Vigilância em Saúde (BRASIL, 2006) aponta alguns parâmetros físicos, químicos e biológicos que devem ser analisados na água para verificar se está apta para consumo humano. Dentre as características físicas analisadas estão a temperatura, sabor e odor, cor, turbidez, sólidos em suspensão e dissolvidos e a condutividade elétrica. Das características químicas são analisados pH, alcalinidade, acidez, dureza, oxigênio dissolvido, demanda química e biológica de oxigênio, entre outros. Os parâmetros biológicos estão relacionados com o controle de microrganismos patogênicos.

O antigo decreto-lei brasileiro que regulamenta as águas naturais e minerais no Brasil determina que tanto as águas como as fontes são classificadas como radioativas quando o teor de radônio dissolvido acima de 5 Mache. Esta unidade equivale a uma concentração elevada de cerca de 60Bq/L. Este decreto subdivide as águas ou fontes consideradas radioativas em fracamente radioativas, radioativas ou fortemente radioativas (BRASIL, 1945).

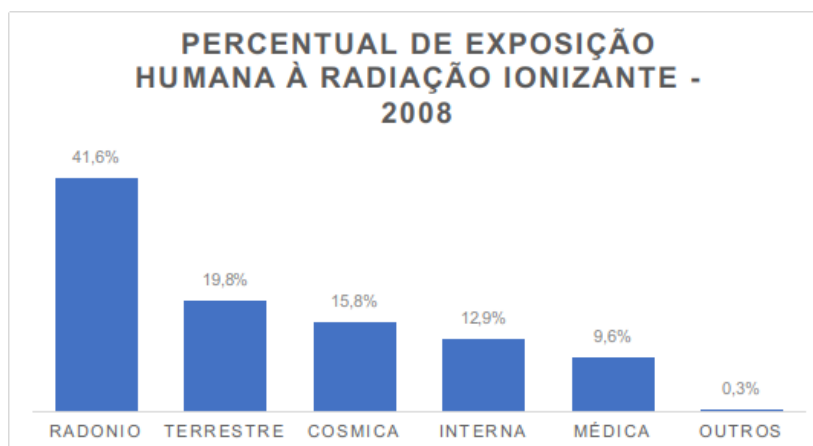
O foco estudado nesta pesquisa é a presença de radionuclídeos como parâmetro relacionado à qualidade da água. Portanto, os itens a seguir tratam de assuntos que auxiliam na compreensão das correlações que permitem as análises quando da apresentação dos resultados deste trabalho.

2.4 RADIOATIVIDADE NATURAL

O ser humano está constantemente exposto à radiação, seja natural ou artificial. Ambas exposições estão relacionadas à dose, que é a grandeza mais importante em relação à influência das radiações nos seres humanos. De forma geral, a maior contribuição de dose está relacionada à radiação natural. Todavia, especificamente para pessoas expostas à radiação médica, categorizada como radiação artificial, em termos proporcionais, a radiação artificial pode ser preponderante (UNSCEAR,2008).

Em termos gerais, a contribuição da radiação natural representa mais de 50% da dose recebida pela população. Especificamente, a radiação natural tem como fonte minoritária os raios cósmicos e fonte principal os radionuclídeos presentes na crosta terrestre, sendo os principais responsáveis pela dose. Na Figura 3 apresenta-se um gráfico ilustrativo com a contribuição das diferentes fontes, tanto naturais como artificiais, para a dose anual ao ser humano (UNSCEAR, 2008).

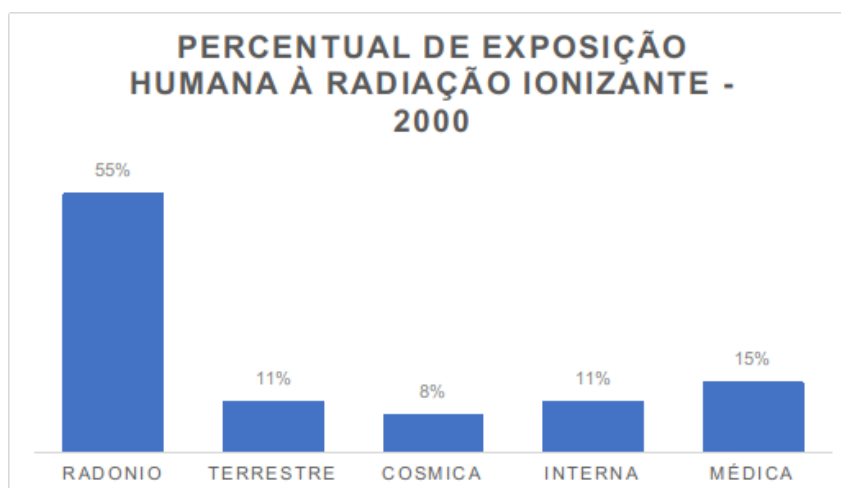
Figura 3 – Percentual de exposição humana proveniente de diferentes fontes naturais e artificiais - 2008



Fonte: adaptado de UNSCEAR (2008).

Na compilação de estudos que gerou o relatório da UNSCEAR (2008), os dados utilizados para o gráfico informativo da Figura 3, são concernentes à população de países onde há um maior número de exames e procedimentos relativos à radiação ionizante. Isto explica porque, para países como o Brasil, onde há pouca atuação da medicina nuclear em relação à países desenvolvidos, a porcentagem do radônio é maior. Na Figura 4 (UNSCEAR, 2000) é possível perceber esta situação. A contribuição da radiação natural nos anos anteriores a 2000 é relativamente maior, por conta de menor uso das radiações ionizantes artificiais na época.

Figura 4 – Percentual de exposição humana proveniente de diferentes fontes naturais e artificiais - 2000



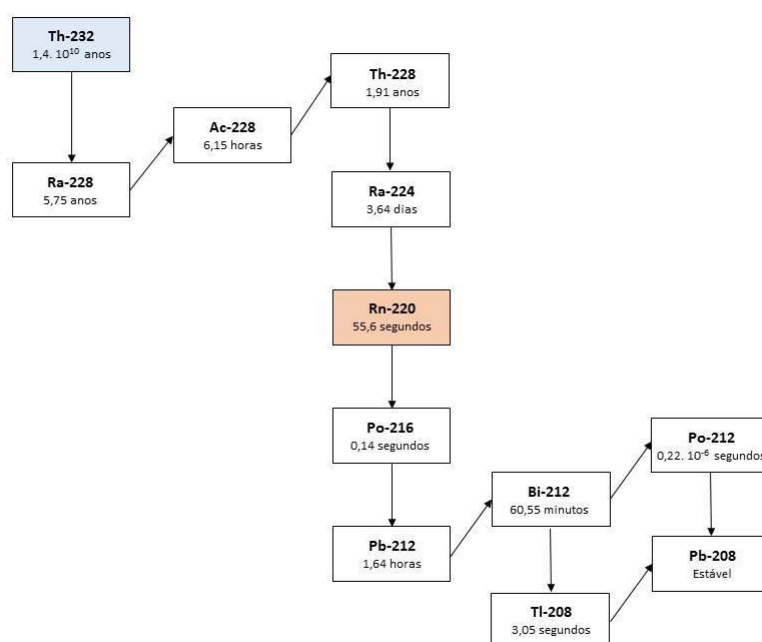
Fonte: adaptado de UNSCEAR (2000).

A radiação natural pode ser proveniente de partículas altamente energéticas vindas do espaço, já mencionadas, que são os chamados de raios cósmicos. Estes raios cósmicos interagem com os elementos constituintes da atmosfera terrestre, produzindo uma cascata de interações. Estas interações nucleares produzem elementos radioativos conhecidos como elementos cosmogênicos. Entre os mais conhecidos estão o H-3 e C-14 (UNSCEAR, 2000).

Os raios cósmicos podem ser divididos com relação às diferentes origens, energia e tipo, fluxo e densidade das partículas. Os tipos de raios cósmicos que contribuem de uma forma mais efetiva para a dose na terra são os de origem cósmica galáctica, os raios cósmicos solares e os com origem no cinturão de Van Allen.

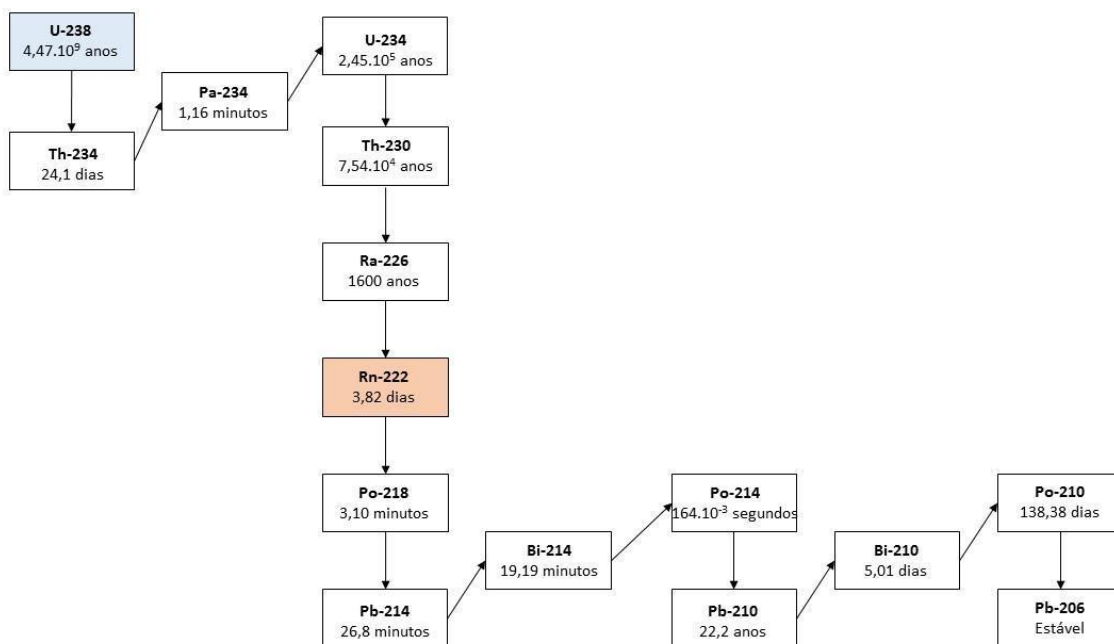
Representando cerca de 75% da dose (radônio, terrestre externa e ingestão) os radionuclídeos naturais representam obviamente a maior parcela da dose recebida anualmente pelo ser humano. Os principais radionuclídeos são o K-40 e as séries de decaimento dos radionuclídeos primordiais: U-238, U-235 e Th-232. Estes elementos possuem meia vida longa. As séries de decaimento dos radionuclídeos primordiais podem ser vistas nas Figuras 5, 6 e 7 (EISENBUD e GESSELL, 1997).

Figura 5– Série de decaimento Th-232



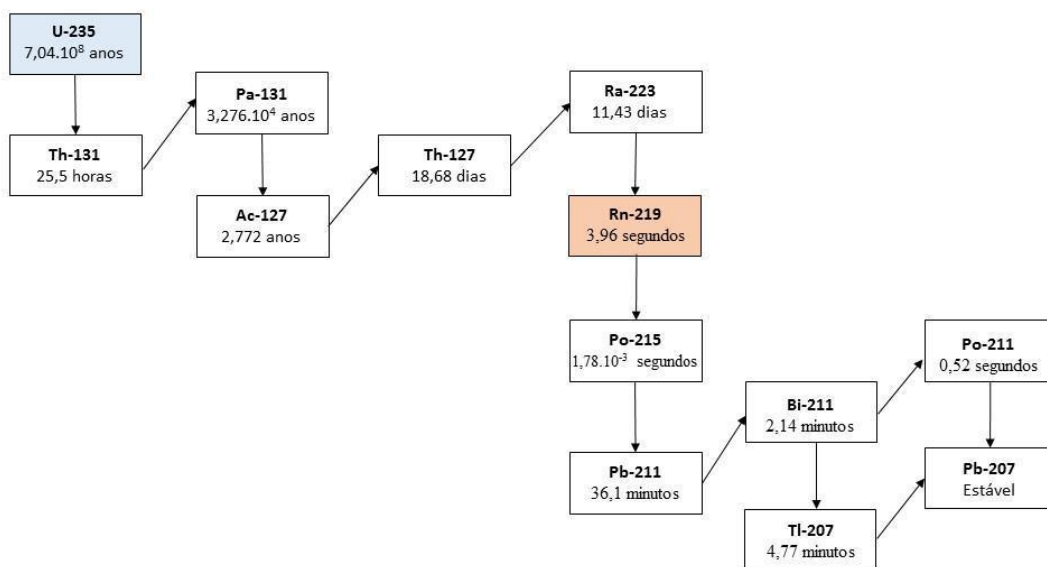
Fonte: adaptado de NNDC (2019)

Figura 6 - Serie de decaimento U-238



Fonte: adaptado de NNDC (2019)

Figura 7 - Serie de decaimento U-235



Fonte: adaptado de NNDC (2019)

Com menor contribuição se comparado com o radônio, os produtos de consumo são aqueles que possuem radionuclídeos presentes em uma baixa concentração. Estes radionuclídeos podem estar presentes nesses produtos de forma natural ou podem ser adicionados. O caso mais conhecido desse tipo de uso é o Ra-226, que por muito tempo foi utilizado devido a sua propriedade de luminescência. Radionuclídeos podem ser utilizados também em detectores de fumaça, para dar cor amarelada ou esverdeada em vidros, medidores de características físicas como pressão, temperatura, umidade, bem como têm uso comum em detectores de volume além do uso importante na esterilização de materiais e alimentos (UNSCEAR, 2008; TAUHATA, 2014).

2.4.1 Radiação Gama Natural

A radiação gama é representada por raios gama que são ondas eletromagnéticas cuja origem é no núcleo do átomo. Há algumas discussões científicas, mas o consenso corrobora esta afirmação (TURNER, 2007). Alguns átomos após passar por um decaimento podem ficar em um estado excitado; para alcançarem um estado mais estável um ou mais fótons gama podem ser emitidos, essa emissão de fótons é chamada de decaimento gama. O decaimento gama não é um decaimento primário, mas ocorre associado aos decaimentos alfa e beta.

Essa emissão de fótons ocorre de forma discreta e característica para cada um dos elementos, desta forma é possível determinar qual é o elemento que originou essa emissão gama relacionando a energia do fóton detectado com a emissão característica de cada elemento. A intensidade de fótons de várias energias pode ser medida para determinar a distribuição de radionuclídeos em uma amostra (TURNER, 2007).

No Brasil a regulamentação de exposição à radiação é realizada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). O órgão não possui um limite específico para radiação gama natural, porém estabelece um limite geral de 10 mSv/ano para qualquer tipo de exposição à radiação natural. Caso a dose esteja acima deste valor medidas de mitigação devem ser realizadas (CNEN, 2005).

2.4.2 Rádio

O rádio é um radionuclídeo proveniente das séries radioativas naturais, do urânio e do tório, e pode ser encontrado em pequenas quantidades no solo, água, rochas, carvão, plantas e alimentos. O Ra-226 é um alfa emissor com meia-vida de aproximadamente 1600 anos decorrente da série radioativa do U-238. As partículas alfa são núcleos de hélio com um baixo alcance podendo ser barrados por uma folha de papel ou pela própria pele. O elemento direto de seu decaimento é o Rn-222 com meia-vida de 3,8 dias (USPHS e USEPA, 1990).

Não há evidências claras que comprovem que a exposição ao rádio, nos níveis encontrados na crosta terrestre, provoca malefícios à saúde, porém acredita-se que uma longa exposição a altas doses de rádio possa provocar anemia, fratura de dentes, câncer e morte (USPHS e USEPA, 1990).

Existe uma similaridade química entre os elementos rádio e cálcio. Ao ser ingerido junto com a água ou com alimentos 20% do rádio é absorvido pela corrente sanguínea sendo levado para várias partes do organismo e se depositando principalmente no tecido ósseo (EISENBUD e GESSELL, 1997). Não existem informações contundentes que mostrem letalidade na exposição prolongada pela ingestão de rádio, porém, vários casos de óbito por câncer no osso foram relatados em pessoas expostas por um logo período a este elemento radioativo (USPHS e USEPA, 1990).

O radônio e outros subprodutos do rádio, por sua vez, também são causadores potenciais de malefícios. O radônio, particularizado em item subsequente, por ser um gás, tem, por sua característica de mobilidade, maiores chances de atingir a atmosfera. Assim, além dos possíveis malefícios que podem ser causados diretamente pelo rádio, devem ser observadas as contribuições de seus filhos.

2.4.3 Radônio

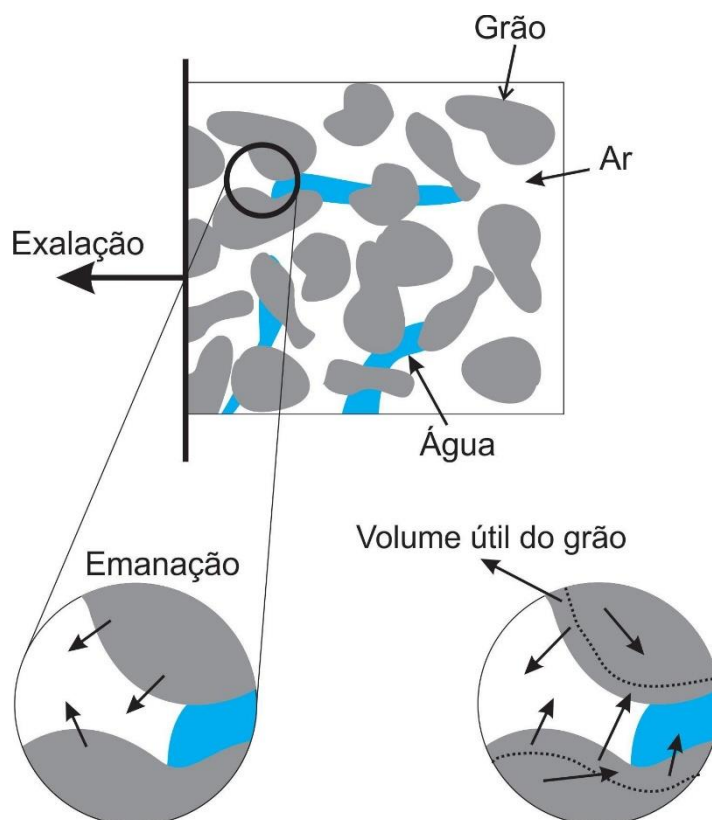
O radônio é um gás nobre naturalmente radioativo presente das séries de decaimento do U-238, U-235 e Th-232. O Rn-222 é produto do decaimento radioativo do Ra-226 a partir de emissão alfa. O Rn-220, também chamado de torônio por fazer

parte da série do Th-232, é produto direto do decaimento do Ra-224, a partir de emissão alfa.

Como já mencionado os isótopos de rádio podem ser encontrados em diversos materiais e ao sofrer decaimento, os isótopos de rádio geram o radônio, que possui uma maior mobilidade e fica livre para se difundir pelo material. O processo de emanação, que é o movimento do átomo de radônio do interior do grão do para o espaço poroso do material, se inicia com o recuo (*recoil*) que ocorre quando o rádio emite a partícula alfa se tornando radônio. Portanto, para que ocorra a emanação, o elemento pai (rádio) deve estar próximo a superfície do material (SAKODA, ISHIMORI, YAMAOKA, 2011).

Depois da emanação o radônio pode chegar a atmosfera principalmente por meio do processo de difusão. Esse processo de movimentação do elemento do meio poroso do material até a atmosfera se denomina exalação. A Figura 8 representa um material com 3 regiões, os grãos em cinza, água em azul e espaço de ar em branco, a figura demonstra os processos de exalação e de emanação (SAKODA, ISHIMORI, YAMAOKA, 2011).

Figura 8 - Processo de exalação e de emanação

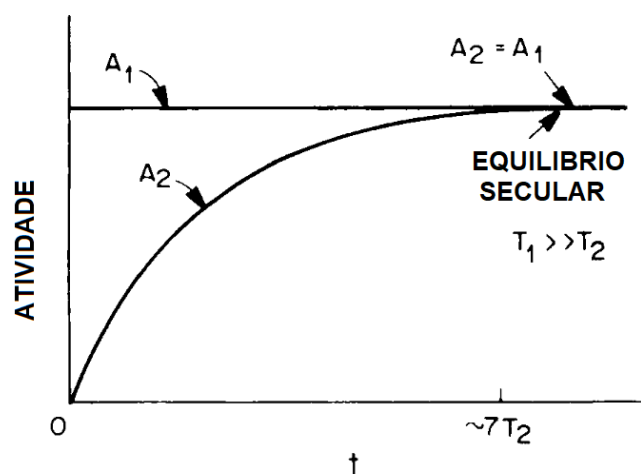


Fonte: Perna (2015).

Observa-se que no caso do isótopo de radônio de meia-vida mais longa, o Rn-222, há maior chance de chegar à atmosfera.

Devido à maior facilidade de realizar as medidas de radônio em relação a medidas de rádio, muitas vezes estas medidas são utilizadas para inferir quantidades de rádio em amostras. Isto é possível se considerado o equilíbrio secular entre os elementos. O equilíbrio secular ocorre quando o elemento pai possui uma meia-vida muito longa comparada com a do filho. Os isótopos de radônio das séries naturais: Rn-222, Rn-220 e Rn-219 (meias-vidas respectivas de 3,8 dias, 59 segundos e 4 segundos) em comparação com os elementos precursores Ra-226, Ra-224 e Ra-223 (ambos com meia-vida de aproximadamente 1600 anos) entram em equilíbrio secular. De forma geral, depois de aproximadamente 7 meias-vidas do elemento filho as atividades podem ser consideradas iguais como pode ser visto na Figura 9 (TURNER, 2007).

Figura 9 – Gráfico que mostra a atividade do elemento pai e a atividade do elemento filho em relação ao tempo de meia-vida



Fonte: Turner (2007).

O patamar observado no gráfico da Figura 9 evidencia a condição de igualdade nas atividades do elemento pai e do elemento filho, justificando inferências para cálculo de concentração de um por meio de medição do outro, eventualmente.

Por ser um gás inerte boa parte o gás radônio inalado é expelido pelo organismo, porém o maior prejuízo para a saúde dá quando o radônio decai dentro

dos pulmões dando origem os seus filhos de meia-vida curta não-gasosos. Outra forma de contribuição dos filhos é que estando acoplados à aerossóis, podem ser inalados se prender ao tecido pulmonar (TURNER, 2007).

O radônio é considerado o segundo maior responsável pelo câncer pulmonar, perdendo apenas para o fumo. Mais especificamente, os produtos de decaimento do radônio se prendem ao tecido pulmonar, que recebe a energia proveniente do decaimento alfa do próprio radônio e dos seus filhos de meia-vida curta, aumentando consideravelmente a probabilidade de desenvolver uma neoplasia (WHO, 2009).

Os limites estabelecidos para concentração de radônio no ar de ambientes de convívio humano, embora restritos a este elemento, levam em consideração a dose no ser humano advinda de toda a série de decaimentos subsequentes. Ou seja, para se estabelecer o limite de 300 Bq/m³, estudos sobre a dose nos pulmões de toda a cadeia foram considerados (WHO,2009).

2.4.4 Radioatividade natural e saúde

A radiação ionizante, quando incide nos átomos e moléculas que compõe o corpo humano, pode provocar ionizações, essas ionizações por sua vez podem provocar a quebra do DNA. Essa quebra da cadeia proteica do DNA tem consequências que vão desde a destruição da célula até a mudança do código genético. Neste último caso, se apesar da mudança do código, a célula sobreviver e conseguir se subdividir, o dano pode significar alterações perpetuadas (UNSCEAR,1993).

Os danos ocasionados pela radiação podem ser classificados em curto e longo prazo. Os efeitos de curto prazo podem aparecer no momento imediatamente após a exposição ou até semanas após a mesma. Esse tipo de efeito ocorre, em geral, quando parte do corpo é exposta a altas doses de radiação em um curto período de tempo, normalmente doses acima de 1 Sv (UNSCEAR,1993).

Os danos em longo prazo podem ser somáticos, que afetam diretamente o indivíduo exposto, se manifestando principalmente por meio de neoplasias ou ser nos fatores genéticos que ocorrem quando as células germinativas são danificadas acarretando problemas para as gerações futuras dos indivíduos (UNSCEAR,1993).

No caso do radônio, pode decair dentro do sistema respiratório depositando toda energia da partícula (pico de Bragg) em um pequeno volume de tecido. Os elementos filhos, gerados pelo decaimento do radônio, em sua maioria são alfa emissores de meia-vida curta, que também depositam a energia da partícula emitida na mesma região. Alguns modelos dosimétricos foram desenvolvidos para auxiliar na compreensão da interação da radiação com o tecido. Dentre os modelos mais conhecidos o encontra-se o *Human Respiratory Tract Model* (HRTM) desenvolvido pelo ICRP (HARRISON, 2014).

O sistema HRTM analisa materiais carregados pelo ar para os pulmões, como radionuclídeos ligados a partículas de aerossóis, possibilitando assim a análise da deposição destes elementos no trato respiratório. O modelo também estuda como a remoção e o transporte desses elementos é realizado no corpo humano (HARRISON, 2014).

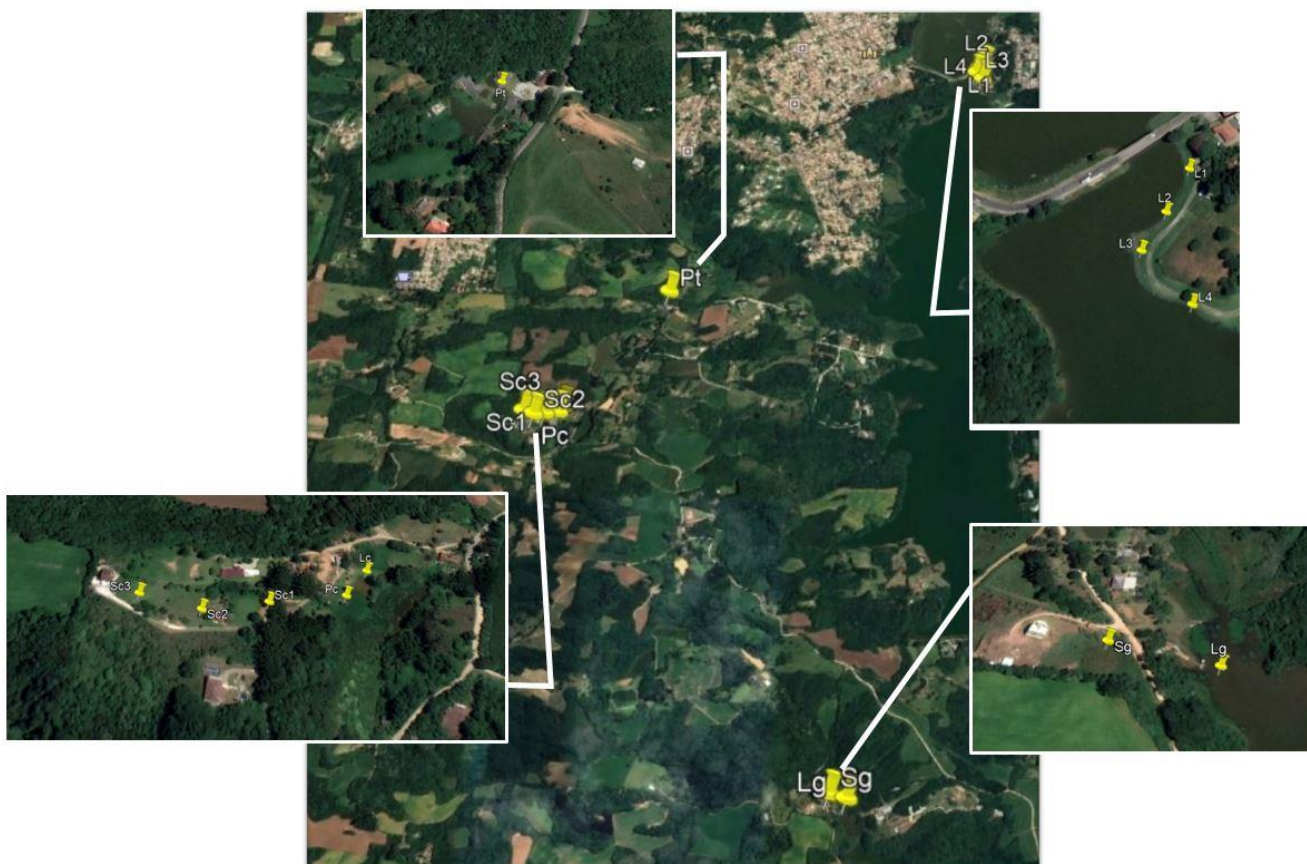
3 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa, realizada na região do APA do Passaúna, se baseou em duas vertentes que se interligaram. As medições gama forneceram um mapeamento que constituiu informações do background da radiação da região em estudo. De forma combinada, investigação sobre radônio e rádio e medições destes radionuclídeos levantaram pontos de medição de gama ambiental. O detalhamento mais específico sobre a localização das medições está descrito em item subsequente.

Neste trabalho, utilizou-se basicamente o equilíbrio secular entre o rádio e o radônio para determinação de concentração de rádio nas amostras de água. Assim, e também por conta de condições explicadas no decorrer deste item, no caso de águas de lago, o elemento de interesse foi o rádio. No caso de medições de solo, foram feitas especificamente medidas de radônio.

As medições gama foram feitas preliminarmente na região do Passaúna, uma área geral, maior e mais abrangente. Os valores mais expressivos dos espectros das medições gama foram utilizados como direcionadores das *áreas de interesse* em monitoramento de rádio e radônio. As *áreas de interesse* são compostas por pequenas chácaras. Os *pontos de medição* específicos dentro destas áreas de interesse foram decididos a partir da facilidade de acesso e apoio da população local. Os pontos de medição estão mostrados na Figura 10.

Figura 10 - Mapa da região do Passaúna com pontos de medição de rádio/radônio



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

Parte das medições (principalmente rádio e radônio) foram feitas em propriedades privadas, cuja autorização prévia dos proprietários/condôminos foi obtida por meio de encontro preliminar com os mesmos, apresentação dos propósitos da pesquisa, detalhamento dos aspectos importantes do monitoramento e de comprometimento de apresentação dos resultados de forma particular para cada proprietário/condômino ou responsável.

A coleta de dados que compreendeu: espectrometria gama local, radônio local em solo e água e posterior radônio/rádio em amostras de água foi feita no período de um ano (junho de 2018 a maio de 2019).

Os detalhes sobre os materiais, equipamentos e métodos de medição estão expostos a seguir.

3.1 ESPECTROMETRIA GAMA AMBIENTAL

A espectrometria gama detecta e caracteriza raios gama emitidos pelos radionuclídeos devido seu decaimento gama. Como os espectros dessas emissões gama são características de cada elemento (inclusive cada isótopo, especificamente) é possível determinar qual o elemento/isótopo originou a emissão (TURNER, 2007).

De forma geral, a detecção é realizada por meio de um cintilador. Cintiladores são materiais com capacidade de emitir fóton luminescentes proporcionais à quantidade e energia da radiação incidente. Os cintiladores inorgânicos são cristais dopados com elementos que possuem essa característica fluorescente; o mais eficiente desses cristais é o NaI(Tl).

As medidas de espectrometria gama desta pesquisa foram realizadas a partir de um espectrômetro gama portátil, modelo AT6101C (*Atomtex*), cuja imagem pode ser vista na Figura 11. Este espectrômetro em questão utiliza um cintilador de NaI(Tl) de volume 63x63 mm associado a um tubo fotomultiplicador.

Figura 11 – Espectrômetro gama portátil pertencente ao DACOC/ UTFPR. A) mochila para transporte do equipamento; B e C) detectores



Fonte: Autoria própria (2019).

O equipamento possui uma fonte natural de potássio K-40 que antes de ser iniciada uma medição deve ser colocada próxima ao detector pois, no momento em que é ligado o equipamento inicia-se um processo automático rápido de estabilização usando como parâmetro a fonte.

O equipamento em funcionamento realiza escaneamento da radiação gama integrando a dose detectada a cada 30 segundos, com avisos em tempo real sobre as condições de medição (baixa radiação, média radiação, alta radiação) considerando radiação ambiental. A partir de um aumento de dose e/ou detecção de presença de algum isótopo de interesse, o equipamento faz imediatamente a identificação dos isótopos e de outras características particulares. O equipamento realiza medidas na faixa de 0,01 à 150 $\mu\text{Sv/h}$, o que em termos de dose de radiação natural é um espectro que varia de baixa dose à alta dose.

O espectrômetro é armazenado em uma mochila específica para o carregamento como já observado na Figura 11. As medidas usuais são realizadas com o equipamento em automóvel em movimento ou carregado a pé, com a mochila na altura das costas do usuário.

As informações obtidas pelo detector são observadas pelo usuário por meio da interface entre o detector um computador *palm top*, que pode ser visto na Figura 12. Por meio do software ATAS Scanner, no computador *palm top* é possível visualizar em tempo real o espectro adquirido bem como o valor da dose de radiação gama.

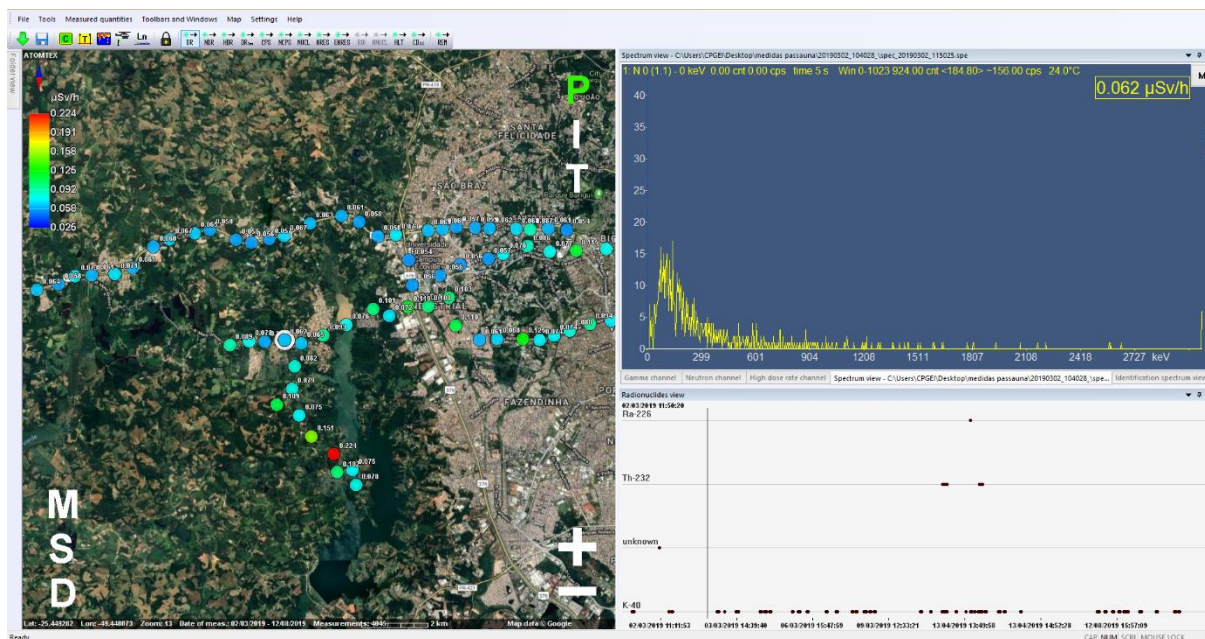
Figura 12 - Palm top utilizado para realizar a interface entre detector e usuário



Fonte: Autoria própria (2019).

Após o término das medidas os dados podem ser baixados e analisados utilizando um software específico GARM como ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Software utilizado para baixar e analisar os dados.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para a realização das medidas gama, o equipamento foi ligado e passou pelo processo de estabilização utilizando K-40, após isso foi colocado no banco do passageiro de carro e de carro percorreu-se a região analisada. Após isso as medidas foram baixadas e analisadas no software GARM.

3.2 MEDIDAS DE RÁDIO E RADÔNIO AMBIENTAL

A detecção dos radionuclídeos rádio e radônio em geral é feita por meio da identificação das partículas alfa advindas dos decaimentos característicos de cada elemento. A identificação do tipo de emissão (neste caso emissão alfa) e da energia da partícula são as principais características mensuradas pelos equipamentos detectores.

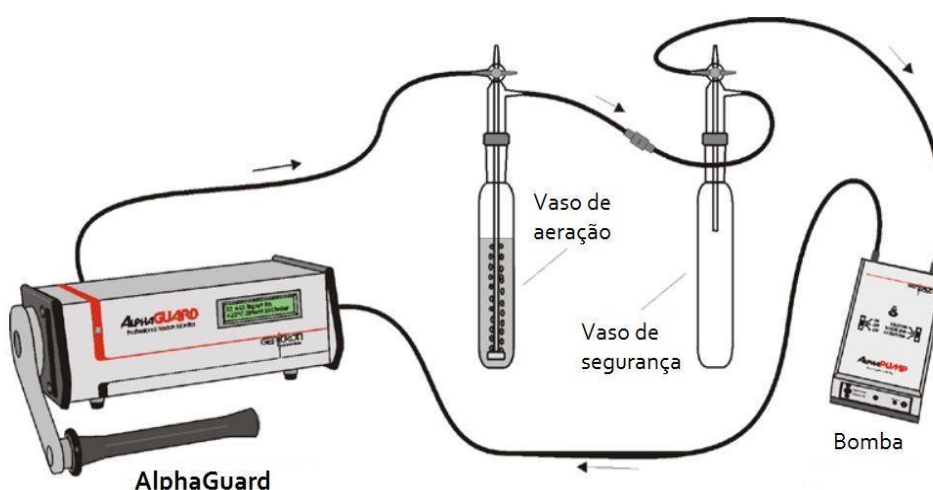
As medidas de rádio e radônio ambiental foram realizadas com o auxílio do monitor AlphaGUARD (Saphymo, atual *Bertin Technologies SAS*). Este equipamento utiliza uma câmara de ionização para realizar as medidas de concentração de radônio.

A câmara de ionização consiste em uma câmara preenchida com ar, um catodo e um anodo que geram um campo elétrico em seu interior. Assim que ocorre a formação do par elétron-íon por meio da ionização do gás, os elétrons migram para o anodo e os íons para o catodo gerando um sinal proporcional a quantidade de ionizações que ocorreram. O AlphaGUARD utilizado não faz distinção entre as energias das partículas alfa, medindo os isótopos de radônio de forma geral.

A câmara de ionização utilizada no AlphaGUARD para detectar as partículas alfa é do tipo pulsada. O equipamento também possui o modo de operação de difusão, onde as partículas de gás difundem por meio de um filtro de fibra de vidro para dentro da câmara de ionização. Câmara de ionização do AlphaGUARD mede concentração de 2 a 2.000.000Bq/m³.

As medições que identificaram a presença de rádio e radônio em água foram realizadas utilizando o equipamento monitor AlphaGUARD com o conjunto específico para medições de água. O AquaKIT é composto por um vaso de aeração, vaso de segurança, mangueiras de conexão. O esquema da Figura 14 mostra o circuito utilizado nas medidas com o AquaKIT.

Figura 14 - Esquema do arranjo AquaKIT

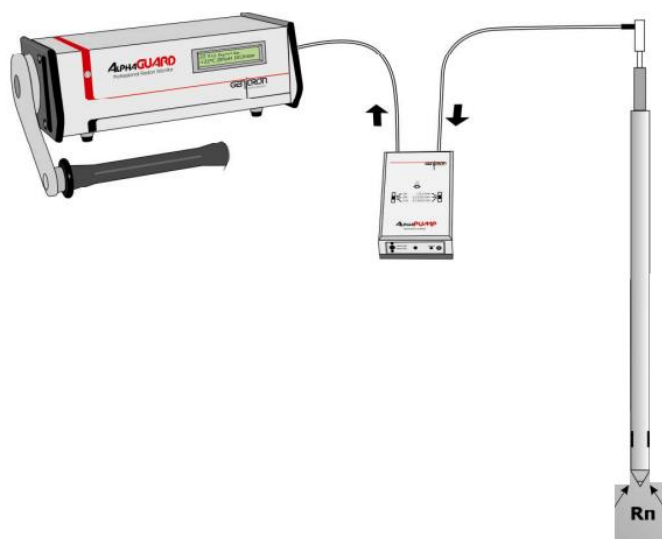


Fonte: Adaptado de Saphymo.

Nota-se pela Figura 14 que, para medições em água, o sistema é fechado (tipo circuito, como mencionado) e que há um vaso de segurança que detém a água

advinda do vaso que contém a amostra, em caso de ocorrência de extravasamento. O mesmo equipamento foi utilizado para realizar as medições de radônio no solo. Para a execução desse tipo de medição é necessário acoplar uma sonda que deve ser introduzida no solo a aproximadamente 1 metro de profundidade. O arranjo utilizado para medida de solo pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Arranjo utilizado para medida de solo



Fonte: Adaptado de Saphymo.

Observa-se da Figura 15 que neste caso, o sistema é aberto. Ou seja, o ar vem do solo, passa pelo detector e é lançado à atmosfera. Isto ocorre em medições de solo *in loco*. Vale ressaltar que em medições eventuais de amostras de solo (o que não é objeto desta pesquisa) o sistema deve ser fechado, com uso de vasos, como usualmente é feito nos laboratórios da CNEN e da UTFPR, quando se trata de medidas de materiais de construção, por exemplo.

3.2.1 Medidas de Rádio e Radônio em Águas

Medidas em água de poço

Para a coleta das amostras de água de poço foi seguido o protocolo que visa a permanência do radônio na amostra e o comportamento da curva associada às

medições em intervalos de tempo, para que seja possível a identificação do radônio suportado e do radônio não suportado. O radônio que está presente na água advindo de exalação do solo para o poço é o radônio não suportado, que vai decair na amostra e não é gerado (na amostra, depois de isolada). O radônio suportado é aquele que é gerado continuamente na amostra, pois é filho do rádio contido na água. Como a meia-vida do rádio é de 1600 anos, sempre há geração de radônio constante na água da amostra.

Os poços de onde foram coletadas as amostras são tubulares e semi-artesianos, utilizam bomba para o transporte da água até a superfície. Ambos os poços são utilizados para consumo da população.

As amostras de água de dois poços, que foram chamados de Pt e Pc, identificados na região de interesse foram coletadas com um frasco plástico, evitando que a amostra fosse agitada no momento da coleta. O ar em excesso foi retirado do frasco que depois foi vedado até o momento da medida. Os frascos foram mantidos hermeticamente fechados durante o intervalo entre as medidas, e após cada medida o ar em excesso foi novamente retirado e a amostra foi vedada novamente. O intervalo (em dias) entre as medidas está descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - O intervalo entre as medidas

Medida 1	Coleta (momento zero)
Medida 2	5 ^o dia
Medida 3	10 ^o dia
Medida 4	16 ^o dia
Medida 5	Mais de 30 dias a partir da medida zero (Equilíbrio secular)

Fonte: Autoria própria (2019).

Em trabalhos de pesquisa de medidas de radônio em água, em geral são feitas apenas duas medições em uma mesma amostra de água. Uma inicial e outra depois do equilíbrio secular. Nesta pesquisa, como mostra a Tabela 1, assim como em CORRÊA (2011), as amostras foram medidas com um intervalo de 5 a 6 dias, gerando mais pontos (dados *versus* tempo para uma mesma amostra) com o objetivo de se ajustar uma curva representativa das concentrações no tempo. A medida final é realizada depois de aproximadamente 30 dias, quando a atividade do radônio é a mesma que seu precursor (pai) o elemento rádio, indicando o equilíbrio secular.

Efetivamente os resultados obtidos nas medições são valores para concentração de radônio na água da amostra, mas tecnicamente o equipamento mede a concentração no ar que perpassa pela amostra de água. O manual do AlphaGUARD fornece os cálculos (equações) que permitem obter os resultados para a concentração na água. As medições foram feitas de acordo com protocolo baseado neste manual, em consonância com ajustes refinados estabelecidos em trabalhos de calibração de intercomparação feitos junto à CNEN/CDTN.

As medidas de água seguiram os parâmetros de *1 min flow*, o que significa que o *software* acoplado faz a integração dos dados em períodos de 1 minuto. O fluxo da bomba que proporciona a circulação do ar pela amostra e equipamento foi de 1L/min, de acordo com o referido protocolo. Cada medida teve tempo total de cerca de 2 horas, sendo que a medição efetiva, com o equipamento em funcionamento durou cerca de 1 hora e 10 min.

Medidas em água de lago

Para a coleta das amostras de água de lago foi seguido um protocolo similar ao de medidas de água de poço, que também visa a permanência do radônio na amostra.

Foram coletadas amostras de três diferentes lagos da região: Lago (reservatório) Passaúna com 4 pontos de coleta, denominados L1, L2, L3 e L4 e dois lagos menores secundários, com um ponto de coleta cada, denominados Lc e Lg. As amostras destas águas de lago foram coletadas seguindo os mesmos cuidados mencionados com a coleta de águas de poço.

Para as amostras de lago optou-se por realizar apenas medidas de rádio, tendo em vista que, devido a agitação da água as medidas de radônio por si só não seriam pertinentes, já que esse escapa para a atmosfera com maior facilidade. Portanto, para águas de lago foram feitas análises após aproximadamente 30 dias, quando o equilíbrio secular foi atingido e assim, identificando, indiretamente a concentração de rádio nas amostras.

Cálculo da concentração de radônio em água

A concentração de radônio em amostras de água é calculada levando em consideração o volume da amostra, o volume do sistema, que podem variar de acordo com o protocolo utilizado e com a quantidade de mangueiras acopladas, bem como a temperatura e a pressão atmosférica, ambas medidas automaticamente pelo equipamento.

Para o protocolo utilizado, a concentração é calculada por meio da Equação 1.

$$C_{\text{água}} = \frac{C_{\text{ar}} \left(\frac{V_{\text{sistema}} - V_{\text{amostra}}}{V_{\text{amostra}}} + K \right) - C_{\text{bg}}}{1000} \quad (1)$$

Onde: $C_{\text{água}}$ é a concentração de radônio na água [Bq/L], C_{ar} é a concentração de radônio no ar do sistema [Bq/m³], V_{sistema} é o volume do sistema [mL], V_{amostra} é o volume da amostra [mL], K é o coeficiente de partição (relacionado com a temperatura do momento da medida), C_{bg} é a concentração de radônio presente no sistema antes do início da medida (*background*) [Bq/ m³].

A equação 3.1 permite que se correlacione o radônio efetivamente medido no ar do sistema com o radônio presente na amostra de água, por onde perpassa o fluxo de ar durante a medição. A isto se devem as correções de volume observadas na equação. O coeficiente K é calculado de acordo com a Equação 2.

$$K = 0,105 + 0,405 \cdot e^{-0,502 \cdot T(^{\circ}\text{C})} \quad (2)$$

O fator K leva em consideração a temperatura T em graus Celsius no momento da medição.

3.2.2 Medidas de Rádio e Radônio em Solo

As medidas de radônio no solo foram realizadas com o equipamento AlphaGUARD, utilizado para as medições do item 3.2.1. O protocolo de medida para solos faz uso de uma sonda que possibilita obter dados do solo abaixo da superfície.

A pesquisa de solo foi realizada em quatro diferentes *pontos de medição* contidos nas chamadas *áreas de interesse*, onde existem os lagos menores. Para a

determinação dos pontos de medida é necessário que o solo não tenha sido mexido, por isso alguns possíveis locais de medições precisaram ser alterados para pontos próximos onde o solo não havia sido mexido.

O arranjo utilizado para as medidas de solo pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Arranjo para medida de solo. A) sonda inserida à 95 cm de profundidade; B) equipamento AlphaGuard; C) Bomba; D) Rotâmetro



Fonte: Autoria própria (2019).

Os *pontos de medição* de radônio no solo foram estabelecidos devido à sua proximidade aos dados obtidos para radioatividade na água (lagos e poços). Antes da medida propriamente dita foi feita a verificação do *background* intrínseco ao equipamento, em sistema fechado com duração de 10 minutos para posterior contabilização. Em pesquisa de radônio em solo é muito comum que o *background* intrínseco seja muito menor que os valores de concentração obtidos nas medições. Após a determinação do *background* foram realizadas as medições efetivas.

O procedimento conta com a inserção de uma sonda no solo, por meio de golpes mecânicos, até profundidade de 1 m. Em seguida, ergue-se a sonda por 5 cm

para possibilitar um volume vazio no solo para auxiliar na sucção do ar dentro do subsolo.

Acopla-se então as mangueiras de conexão como mostrado na Figura 11. O sistema para medição no solo é aberto. Portanto, o ar passa pela bomba de sucção (1L/min), pelo equipamento AlphaGUARD configurado para *1 min flow* e por um rotâmetro. É importante observar que é bastante comum, no momento da medição, não obter fluxo de ar suficiente. Neste caso, o ponto de medição é descartado e procura-se outro, próximo que ofereça condições. O LFNA estabeleceu um passo a mais no sistema sugerido no manual, que constitui o uso de um medidor de volume de ar, além do rotâmetro que rapidamente indica se há fluxo de ar no procedimento.

Em geral, medições de radônio em solo têm concentração na ordem de centenas de kBq/m³, o que para o monitor AlphaGUARD (limite de medição de 2.000.000 Bq/m³) é um valor alto. Neste sentido, e principalmente pelo risco de contaminação do equipamento por filhos de meia-vida curta aderidos às paredes da câmara de ionização, imediatamente após cada medição de solo deve-se ventilar o equipamento até que o *background* retorne a valores de referência. Ressalta-se que o tempo para este procedimento pode ser de algumas horas apenas ou até de vários dias.

Desta forma, finalizou-se a coleta de dados dos quatro pontos de medição, durante um período de coleta de 3 meses, com medidas rejeitadas, medidas incompletas e medidas realmente efetivas.

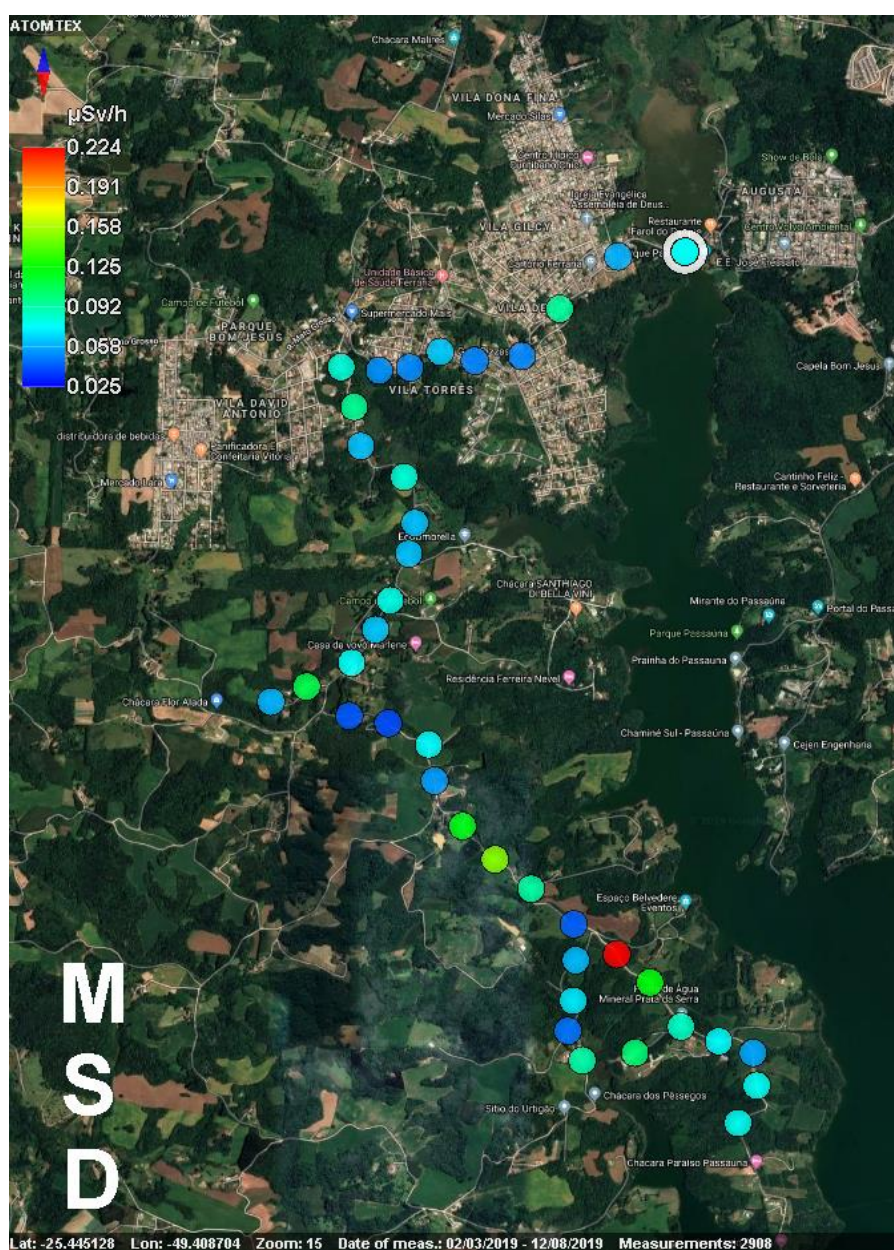
Os resultados dos cálculos relacionados às medições de gama ambiental, rádio e radônio em água e de solo, assim como os erros associados, são apresentados e discutidos no capítulo a seguir.

4 RESULTADOS

4.1 ESPECTROMETRIA GAMA AMBIENTAL

Os pontos identificados da região do Passaúna situada no município de Campo Largo avaliados por meio de espectrometria gama podem ser visualizados no mapeamento exposto na Figura 17, onde é possível observar os valores de dose fornecidos pelo espectrômetro, em uma sequência de pontos (locais) no mapa.

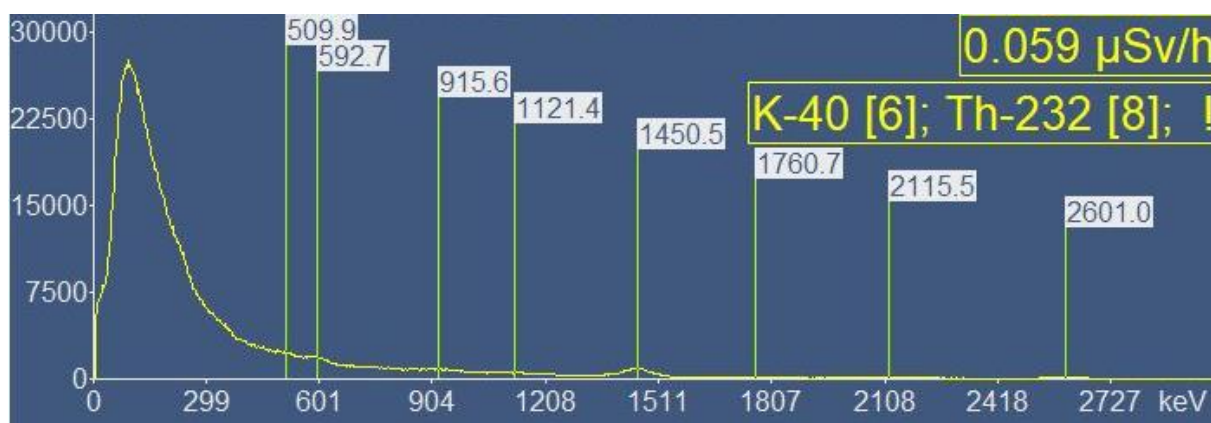
Figura 17 - Mapeamento dos valores de dose fornecidos pela espectroscopia gama



Fonte: Autoria própria (2019).

Por meio do ATAS, em cada ponto no mapa foi gerado um espectro relacionando energia da radiação gama (eixo ordenadas) e contagens (eixo abscissas). A Figura 18 mostra o espectro total de todas as medidas feitas na região do Passaúna.

Figura 18 - Espectro total das medidas gama da região do Passaúna



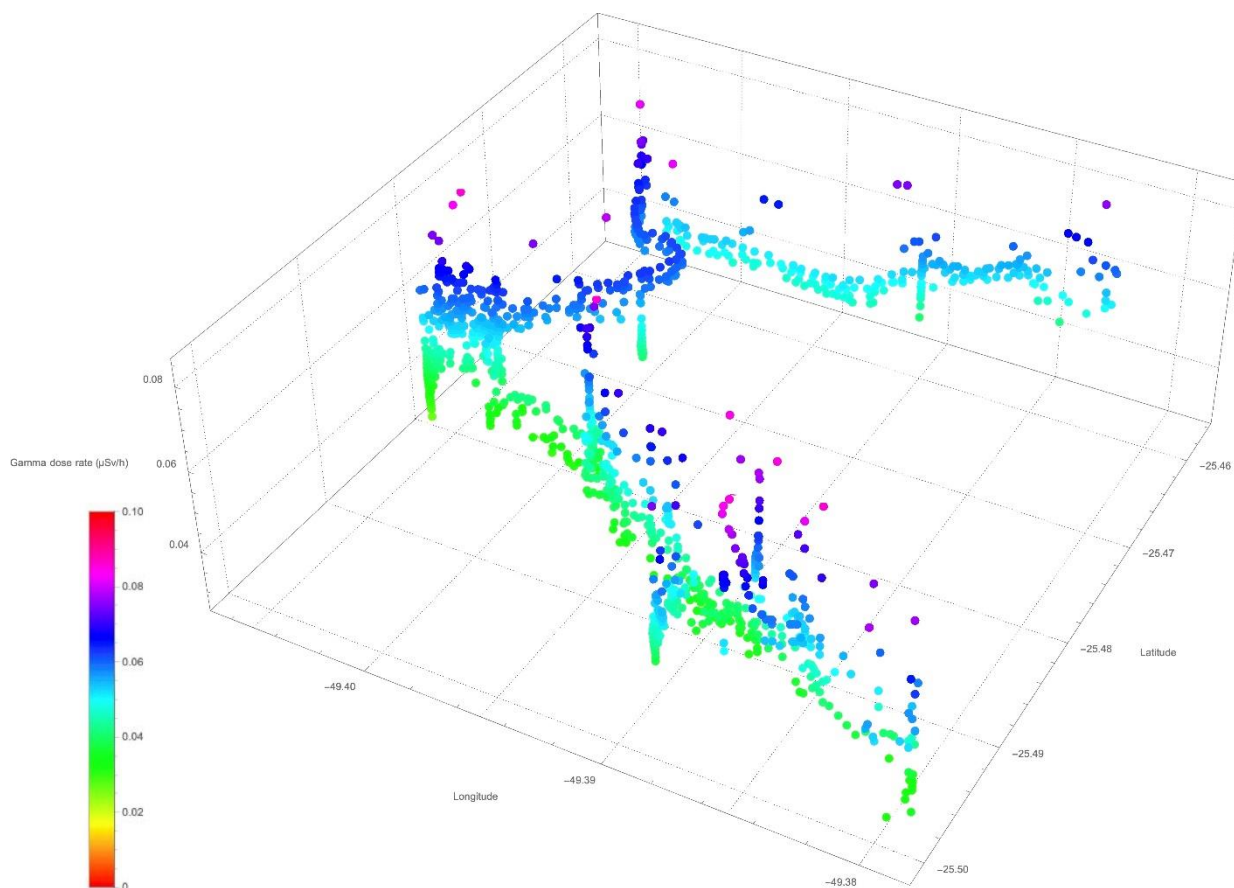
Fonte: Autoria própria (2019).

Este espectro (Figura 18) representa a integração dos espectros de cada ponto de medição.

Para cada ponto há um espectro similar gerado. São cerca de 3 mil gráficos. Então, optou-se por apresentar os agrupamentos propostos pelo programa GARM. Os espectros específicos para agrupamentos de pontos têm caráter similar ao da Figura 18, em termos de apresentação (gráfico) e podem ser visualizados no Apêndice B.

Com os dados de localização (latitude e longitude) e os dados de taxa de dose fornecidos pelas medidas de espectroscopia gama (cerca de 3 mil pontos) foi gerado o gráfico utilizando o software Mathematica (Wolfram Research Inc.,2018) apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico relacionando os dados de localização e os valores de taxa de dose fornecidos pelas medidas de espectroscopia gama



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir do gráfico gerado pelos dados (Fig. 19) é possível perceber que o ajuste ressalta os pontos onde a taxa de dose foi mais alta. Mas observando os valores de escala da taxa de dose, estes valores não são considerados altos, pois os resultados das medidas de espectrometria gama ambiental da região do Passaúna situada no município de Campo Largo encontraram valores de 0,052 até 0,204 $\mu\text{Sv/h}$.

Considerando o limite de 10 mSv/ano para a população em geral, relacionado à dose anual (exposição natural), as doses medidas estão abaixo e não configuram anomalias.

O limite mencionado no parágrafo anterior é geral para todos os tipos de radiação natural. Neste contexto, por mais que não exista uma norma específica que

determine o limite de exposição à radiação gama natural esses valores são importantes para se observar um panorama geral dos níveis de radiação na região.

4.2 MEDIDAS DE ÁGUA DE POÇO

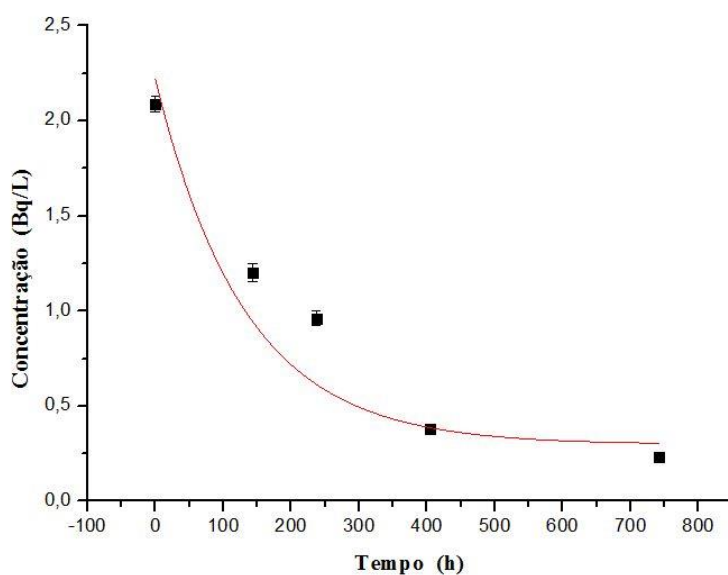
Foram realizadas medidas de água de dois diferentes poços, Pt e Pc, como já mencionado no item 3.2. Os resultados encontrados para a concentração de radônio em Bq/L podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultado das medições de concentração de radônio em água de poço

	Pt		Pc	
	Medida (Bq/L)	Erro	Medida (Bq/L)	Erro
Medida 1	6,16	0,06	2,18	0,03
Medida 2	2,84	0,18	1,20	0,05
Medida 3	1,40	0,06	0,96	0,04
Medida 4	0,59	0,03	0,38	0,03
Medida 5	0,16	0,02	0,23	0,02

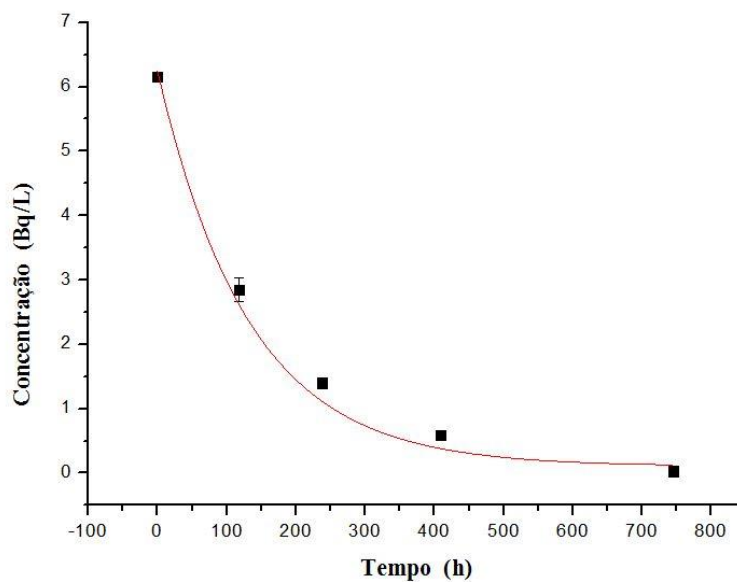
Devido ao fato de as medições terem sido realizadas em 5 momentos diferentes (item 3.2) é possível ajustar uma curva aos dados da Tabela 2, o que implica, a partir de parâmetros como o tempo de meia-vida, obter os valores, no tempo, da concentração de Rn na amostra desde a sua coleta, até atingir o equilíbrio secular. Estas curvas estão apresentadas nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 - Curva de decaimento em Bq/L referente a amostra do poço Pc



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 21 - Curva de decaimento de radônio em Bq/L referente a amostra do poço Pt



Fonte: Autoria própria (2019).

A Equação 3 mostra a função utilizada para o ajuste da curva de decaimento:

$$A_{Rn}(t) = A_{0Ra} (1 - e^{-\lambda_{Rn}t}) + A_{0Rn}(e^{-\lambda_{Rn}t}) \quad (3)$$

Onde $A_{Rn}(t)$ é a concentração de radônio em função do tempo, $A_{0 Ra}$ é a concentração inicial rádio na amostra (constante) $A_{0 Rn}$ é a concentração inicial de radônio na amostra e λ_{Rn} é a constante de decaimento do radônio.

O ajuste permite perceber que resultados apresentam valores bastante elevados de radônio para o instante zero (inicial, que coincide com o momento de coleta da amostra); mais de 10 vezes o limite estabelecido. Porém, observa-se que passados cerca de 16 dias, a concentração de radônio reduz para valores abaixo ou bem próximos do valor limite de 0,5 Bq/L. Esta situação de redução indica que nas amostras há pouca presença de radônio suportado, relacionado à presença de rádio na água. A mesma situação, vista sob o ponto de vista da presença de radônio não suportado, leva a concluir que estas fontes de água não são seguras para o consumo imediato, mas podem ser consumidas após alcançar o equilíbrio secular.

4.3 MEDIDAS DE ÁGUA DE LAGO

Foram realizadas medições da água dos 4 pontos de coleta do reservatório Passaúna, como já mencionado no item 3.2. Os resultados encontrados para a concentração de radônio/rádio em Bq/L das amostras na represa do Passaúna podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado das medidas de radônio/rádio das amostras coletadas na represa do Passaúna

	Medida (Bq/L)	Erro
Amostra Lp1	0,180	0,015
Amostra Lp2	0,260	0,027
Amostra Lp3	0,240	0,023
Amostra Lp 4	0,200	0,025
Lp Média	0,220	0,046

Fonte: Autoria própria (2019).

Ressalta-se que estes resultados são fortemente relacionados à presença de rádio nas amostras, feitas indiretamente no equilíbrio secular entre radônio e rádio.

Ou seja, a concentração nas amostras se devem, neste momento, exclusivamente ao radônio suportado. Os valores encontrados estão dentro dos limites estabelecidos pela norma descrita na WHO - Guidelines for drinking-water quality (2017).

De forma análoga, os resultados das concentrações de radônio/rádio nos lagos secundários (Lc e Lg) estão apresentados na Tabela 4. A medida Lg foi realizada propositalmente próxima à região onde os valores de espectroscopia gama mostraram-se elevados.

Tabela 4 - Resultado das medidas de radônio/rádio das amostras coletadas nos lagos secundários da região

	Medida (Bq/L)	Erro
Lc	0,234	0,020
Lg	0,395	0,031

Fonte: Autoria própria (2019).

Estes resultados para os lagos secundários são relacionados à presença de rádio nas amostras, como se mencionou para o lago Passaúna. Ambos os valores de concentração de radônio/rádio medidos nos lagos Lc e Lg, de 0,234 e 0,395 respectivamente, estão abaixo do limite de 0,5 Bq/L estabelecido. Percebe-se que apesar dos valores de radiação gama da região do lago Lg estarem altas, quando comparado com os outros pontos da região, a medição da concentração de rádio nas amostras de água está dentro do limite de alfa total estabelecido mundialmente.

Isto leva a inferir que o rádio, possivelmente presente no solo da região, não difunde de forma expressiva para a água dos lagos.

4.4 MEDIDAS DE SOLO

As medidas de radônio no solo (Sc1, Sc2 e Sc3) foram realizadas na região próxima ao poço analisado Pc. A medida de radônio no solo (Sg) foi realizada próxima à região onde os valores de espectroscopia gama mostraram-se elevados. Os valores de concentração de radônio encontrados nas medidas de solo podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados das medidas de radônio no solo

	Medida (Bq/m³)	Erro
Sc1	37.900	1.500
Sc2	34.200	3.200
Sc3	112.000	14.000
Sg	9.200	830

Fonte: Autoria própria (2019).

Pode-se perceber que, para o ponto de medição Sg, por mais que os resultados observados na medição de espectrometria gama sejam mais altos que outros pontos da região em geral o valor da concentração de radônio no solo foi mais baixo. A médias dos pontos Sc foi de 61.200 ± 3.600 Bq/m³ comparado com 9.200 ± 800 Bq/m³ do ponto Sg. Portanto os pontos Sc1, Sc2 3 Sc3, medidos, tiveram como resultado uma concentração maior que o ponto Sg mesmo que considerada a margem de erro nas medições.

5. CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho foi possível fazer a avaliação da radioatividade natural em pontos de interesse do APA Passaúna. Os resultados das medidas de espectrometria gama ambiental da região indicaram valores que ficaram na faixa de 0,052 até 0,204 $\mu\text{Sv/h}$, os quais estão abaixo do limite para a população em geral, de 10 mSv/ano, inclusive se consideradas as faixas de erros obtidas nas medidas. Os valores obtidos com a espectrometria gama foram utilizados para auxiliar na definição dos pontos de medição de radônio e rádio em águas de lago e de poço, e também para medidas de radônio no solo.

Os valores de concentração de radônio nas amostras de água de poço foram de $6,16 \pm 0,06$ e de $2,18 \pm 0,03$ Bq/L, valores que estão acima do limite estabelecido de 0,5 Bq/L, porém após atingir o equilíbrio secular seus valores foram de $0,16 \pm 0,02$ e $0,23 \pm 0,02$ Bq/L, ambas dentro dos limites. Tanto as amostras retiradas da represa do Passaúna, quanto as amostras dos lagos secundários analisados apresentam valores de concentração de rádio dentro dos limites, $0,395 \pm 0,031$ Bq/L; $0,220 \pm 0,046$ e $0,234 \pm 0,020$, respectivamente. Já a concentração de Rn no solo variou de 9.200 ± 800 à 112.000 ± 14.000 Bq/m³.

As medidas de espectroscopia gama da região trouxeram um panorama médio da dose, as amostras os resultados não mostraram uma relação clara entre os valores mais altos de dose com os valores mais altos da concentração de rádio e radônio, porém sugere-se trabalhos futuros para que se compreenda melhor esta correlação.

A pesquisa desenvolvida serve como referência na contribuição com dados na região do Passaúna e contribui à CNEN e ao NIT/CEDS para seus estudos sobre a radioatividade natural.

REFERÊNCIAS

ABAS-Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. **Águas subterrâneas, o que são?** São Paulo, 2017. Disponível em: < <https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/> >. Acesso: agosto de 2019.

BHERING, S. B.; SANTOS, H. G.. **Mapa de solos Estado do Paraná: legenda atualizada.** Embrapa Solos: Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. Decreto-Lei nº 7.841 de 8 de Agosto de 1945. **Código de Águas Minerais. Diário Oficial da União,** Rio de Janeiro, 20 Ago. 1945.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. **Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências.** Brasília, DF, jul. 2000.

BRASIL. Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Brasília, DF, dez. 2011.

Brasil. Ministério da Saúde. **Manual de procedimentos de vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano.** Brasília, DF. 2006.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. **NN 3.01/007 Níveis de intervenção e de ação para exposição crônica.** 2005. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=3>>. Acesso em: setembro de 2019.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. **NN 3.01/005 Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação de áreas.** 2011. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=3>>. Acesso em: setembro de 2019.

COMEC – Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. **Localização das Áreas de Proteção Ambiental da RMC.** Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://www.comec.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=37>>. Acesso: agosto de 2019.

COMEC – Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. **Zoneamento da APA do Passaúna**. Curitiba, 2012. Disponível em: < http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/COALIAR/CTPLAN/gt_psa/2a_reuniao/Apresentacao_APA_Passauna_comec.pdf>. Acesso: setembro de 2019.

CONEJO, J. G. L. **Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil**. Brasília-DF. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2007.

CORRÊA, J. N. **Avaliação dos Níveis de Concentração de Radônio em Ambientes e Águas de Poços no Estado do Paraná**. 2011.112 p. Tese. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

DIAS, M. do C. O.; PEREIRA, M. C. B.; DIAS, P. L. F.; VIRGÍLIO, J. F. **Manual de impactos ambientais: orientações básicas sobre aspectos ambientais de atividades produtivas**. Fortaleza – CE, 1999.

EISENBUD M.; GESELL, T. **Environmental Radioactivity From Natural, Industrial and Military Sources**. 4ª ed. Califórnia: Academic Press, 1997.

HARRISON, J. Current and forthcoming ICRP recommendations on radon exposure. In: **International Conference on Occupational Radiation Protection**. 2014. Disponível em: < <http://www.irpa12.org.ar/fullpapers/FP0947.pdf>>. Acesso: agosto de 2019.

IAEA - International Atomic Energy Agency. **The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition**, Technical Reports Series No. 476, IAEA, Vienna, 2014.
IAP- Instituto Ambiental do Paraná. Lista Geral das Unidades de Conservação Estaduais. Curitiba, 2012.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **ICRP 126 Radiological Protection against Radon Exposure**. Oxford: Pergamon Press, v. 38, n. 1-2, 2008.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**, 2017. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso: setembro de 2018.

Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília, 2006.

National Council on Radiation Protection and Measurements Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. **NCRP Report No. 160**. United States, 2009.

NEZNAL, M.; NEZNAL, M.; ŠMARDÁ, J. Assessment of radon potential of soils: a five-year experience. **Environment International**, v. 22, p. 819-828, 1996.

NEZNAL, M. Permeability as an important parameter for radon risk classification of foundation soils. **Annals of Geophysics**, v. 48, n. 1, 2005.

NNDC. National Nuclear Data Center. **Chart of Nuclides from Brookhaven National Laboratory**. Disponível em: www.nndc.bnl.gov/chart. Acesso: maio de 2019.

OKUNO, E.;YOSHIMURA, E. **Física das Radiações**. Oficina de Textos: São Paulo. 1 ed. v. 1, p. 203 – 221, 2010.

PEREIRA, R. M. **Uso e Ocupação do Solo como Parâmetro de Indicadores Ambientais de Sustentabilidade: Microrregião Meia Ponte (região sul do estado de Goiás)**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Produção Sustentável) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiás, 2012.

PERNA, A. F. N. **Taxa de Exalação de Radônio-222 de Concreto e Argamassa de Cimento Usados na Construção Civil**. 2016. 94 p. Dissertação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

PMC-Prefeitura Municipal de Curitiba. **Plano Municipal de Abastecimento de Água**. Curitiba,2017.

SANTOS, C. E. L. **Determinação dos processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas de fluorite e carvão do estado de Santa Catarina: critérios para avaliação dos riscos biológicos**. 2008. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

SANTOS, T. O. **Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, 2010. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Nuclear, UFMG.

SCANLON, B. R. *et al.* Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources : Quantity versus quality. **Water Resources Research**. v. 43, n W03437, p. 1-18, 2007.

TAUHATA, L. *et al.* **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Ed. 10^a. Rio de Janeiro. IRD/CNEN, 2014.

TURNER, J. E. **Atoms, Radiation, and Radiation Protection**. 3^a ed. Wiley-VCH Verlag, 2007.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Anexo A, 2008. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Anexo B, 2008. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Anexo II, 2006. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Anexo I, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Anexo A, 1993. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UOSIF, M. A. M. MOSTAFA, A.M.A. REDA, E. EL-SAYED, M. Natural radioactivity levels and radiological hazards indices of chemical fertilizers commonly used in Upper Egypt. **Journal of radiation research and applied sciences**, v. 7, n. 4, p. 430-437, 2014.

USPHS e USEPA – United States Public Health Service and United States Environmental Protection Agency. **Toxicological Profile for Radium**. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: 1990.

SAKODA, A.; ISHIMORI, Y.; YAMAOKA, K., A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock soil, Mill tailing and fly ash. **Applied Radiation and Isotopes**. v. 69, p. 1422-1435, 2011.

WHO – World Health Organization. **Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective**, Switzerland: WHO press, 2009.

WHO – World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality**. Switzerland: WHO press, 2017.

WOLFRAM RESEARCH, Inc. **Mathematica**. Version 12.0. ed. Champaign, Illinois: Wolfram Research, Inc., 2018.

APÊNDICE A – Lista de medidas

Tabela A 1 – Lista dos pontos de medida

Medida	Latitude	Longitude
Lp1	25°27'25.11"S	49°22'55.59"O
Lp2	25°27'26.40"S	49°22'56.27"O
Lp3	25°27'27.50"S	49°22'56.96"O
Lp4	25°27'29.00"S	49°22'55.56"O
Pt	25°28'20.74"S	49°23'56.94"O
Pc	25°28'46.30"S	49°24'15.41"O
Lc	25°28'45.30"S	49°24'14.64"O
Sc1	25°28'46.74"S	49°24'17.88"O
Sc2	25°28'47.16"S	49°24'19.92"O
Sc3	25°28'46.73"S	49°24'21.81"O
Sg	25°29'51.75"S	49°23'21.01"O
Lg	25°29'52.39"S	49°23'18.00"O

APÊNDICE B - Espectro das medidas gama da região do Passaúna

Figura B 1 - Espectro ponto 1

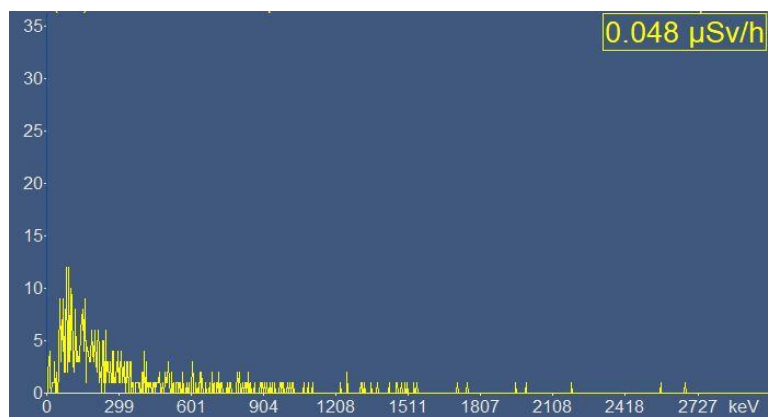


Figura B 2 - Espectro ponto 2

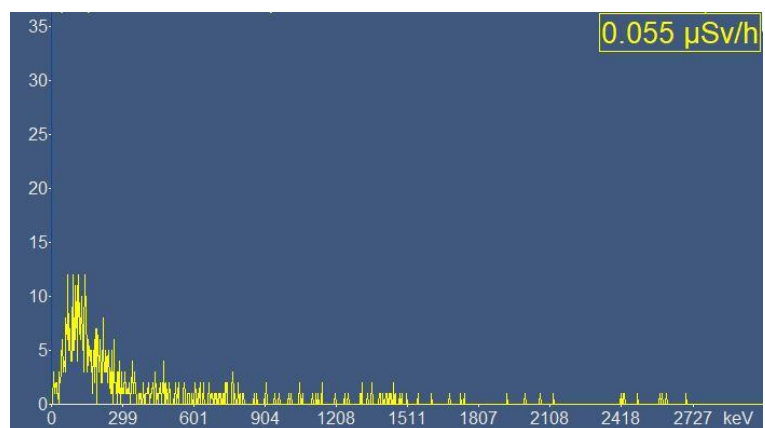


Figura B 3 - Espectro ponto 3

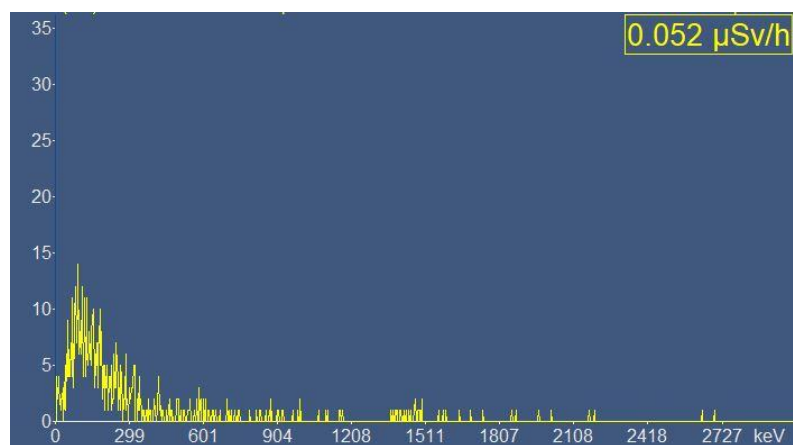


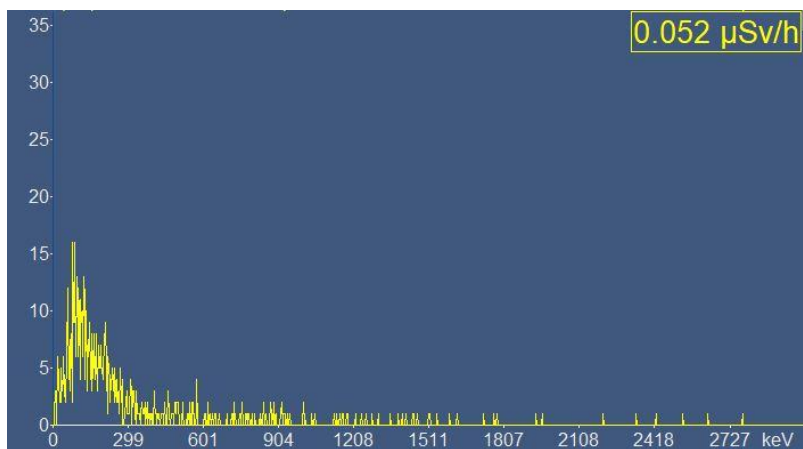
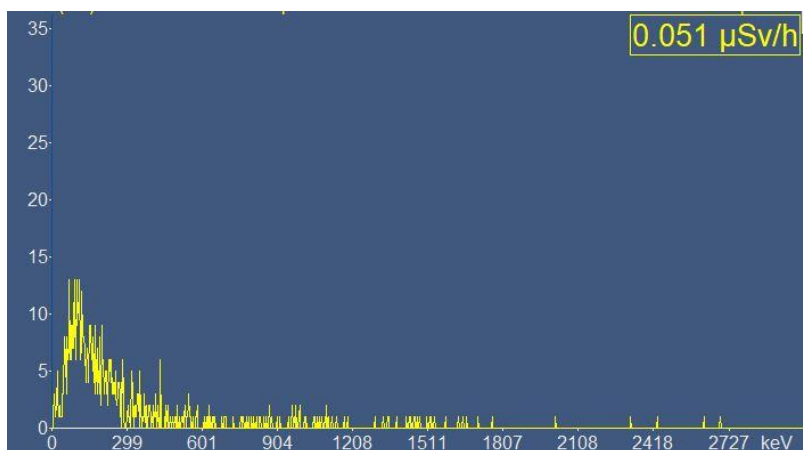
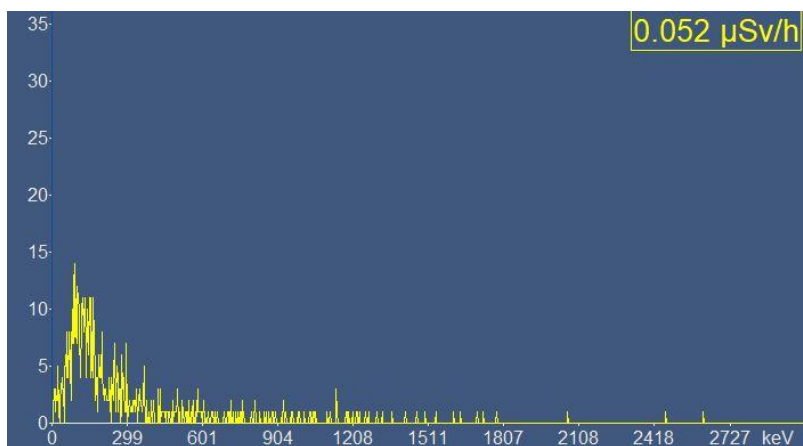
Figura B 4 - Espectro ponto 4*Figura B 5 - Espectro ponto 5**Figura B 6 - Espectro ponto 6*

Figura B 7 - Espectro ponto 7

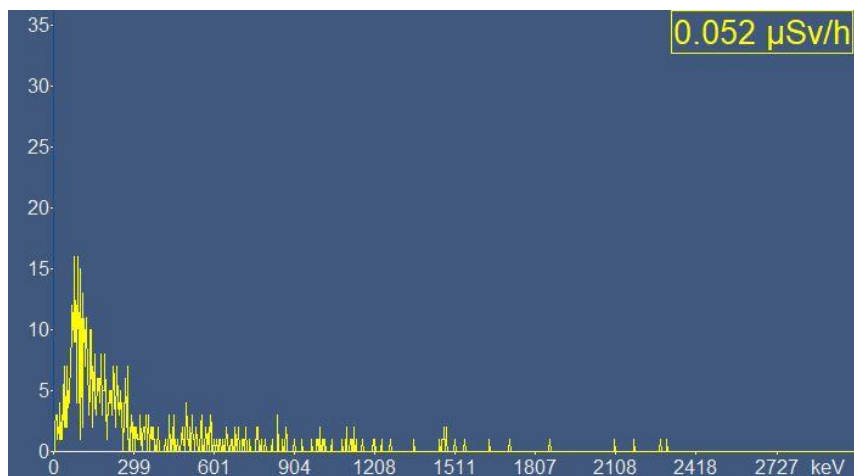


Figura B 8 - Espectro ponto 8

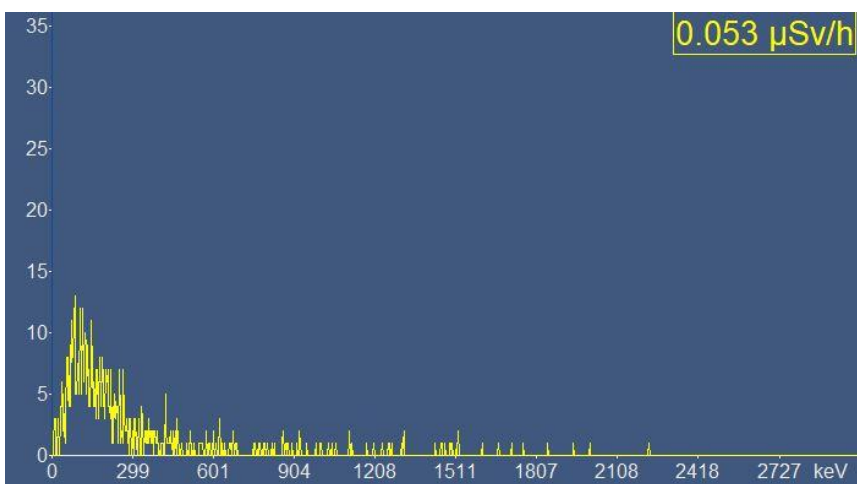


Figura B 9 - Espectro ponto 9

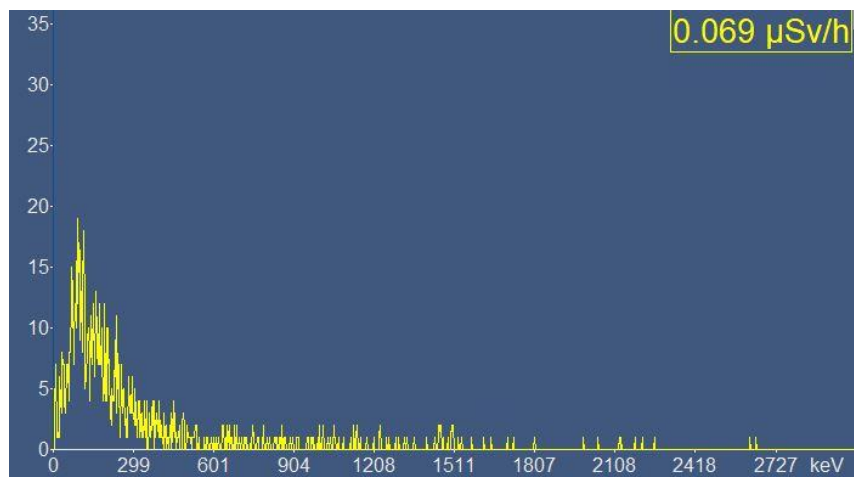


Figura B 10 - - Espectro ponto 10

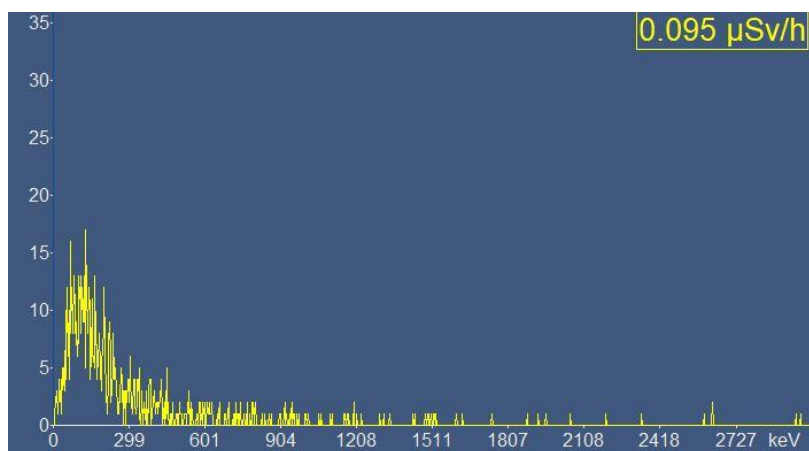


Figura B 11 - Espectro ponto 11

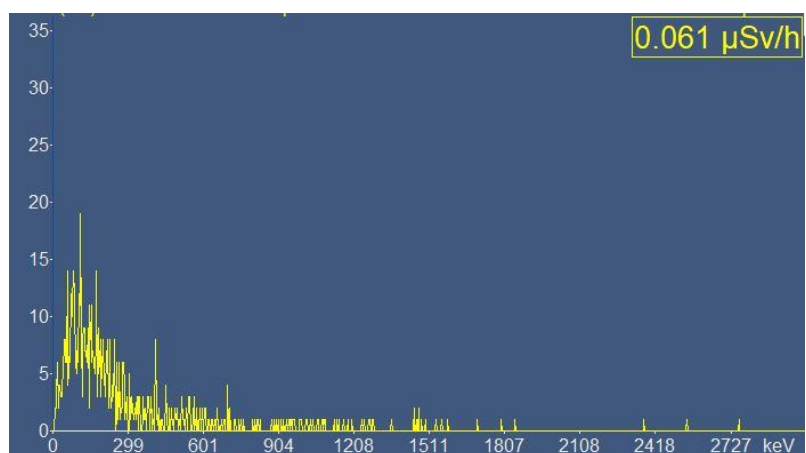


Figura B 12 - Espectro ponto 12

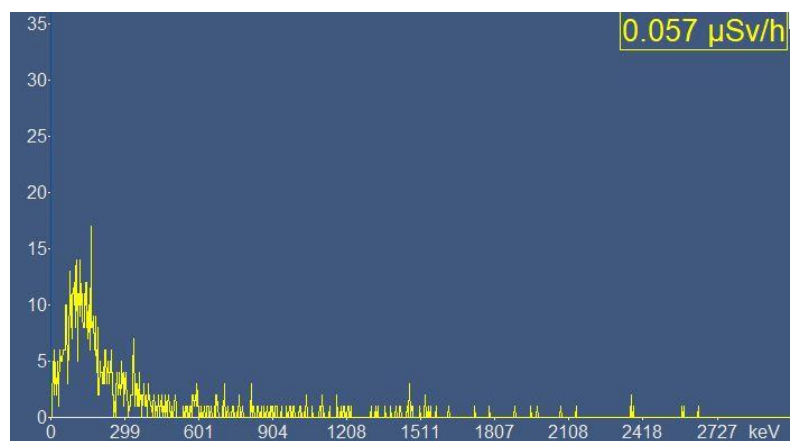


Figura B 13 - Espectro ponto 13

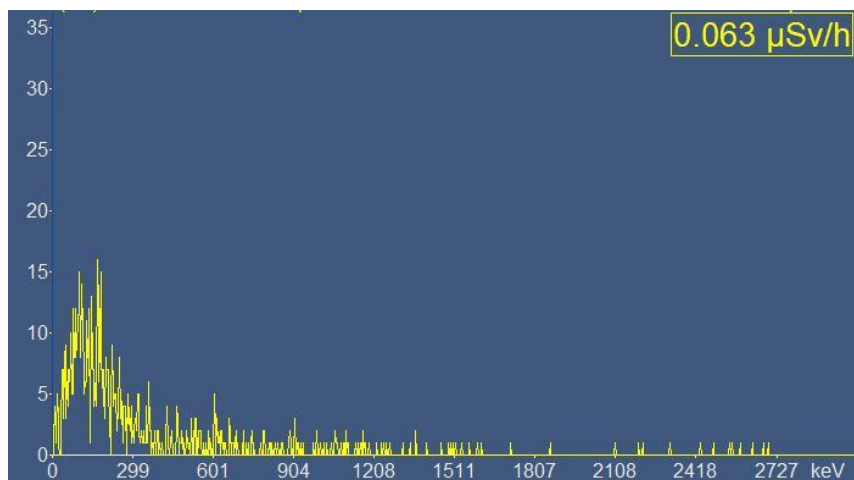


Figura B 14 - Espectro ponto 14

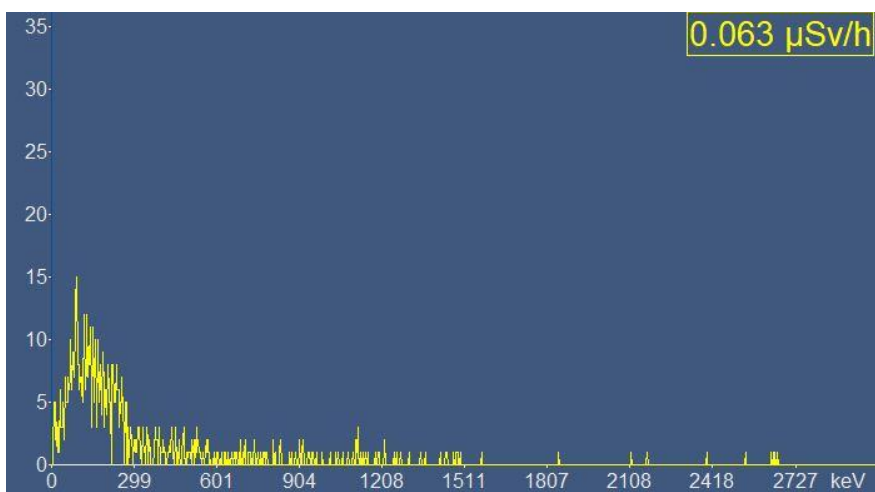


Figura B 15 - Espectro ponto 15

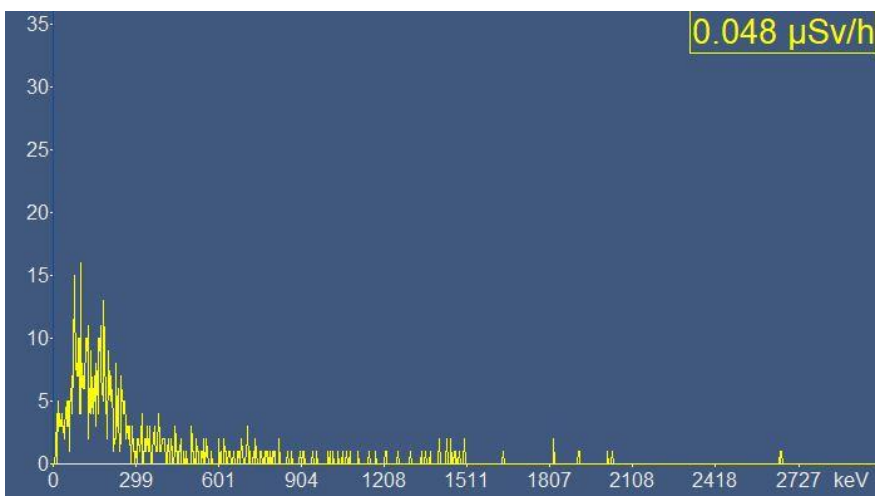


Figura B 16 - Espectro ponto 16

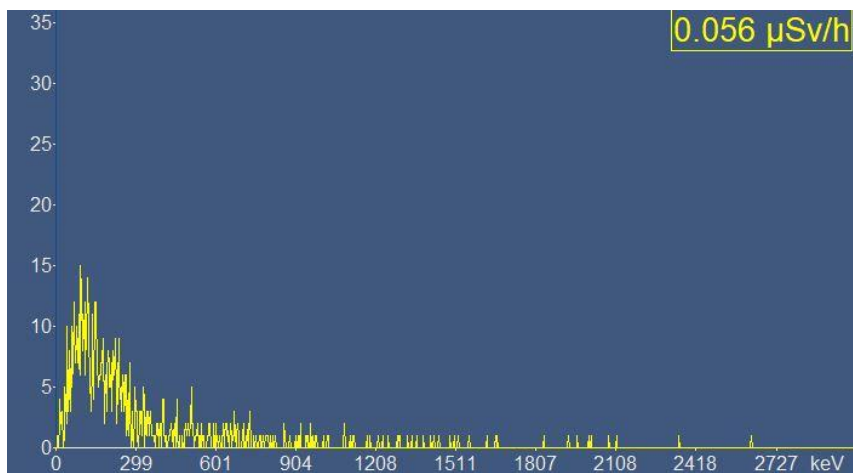


Figura B 17 - Espectro ponto 17

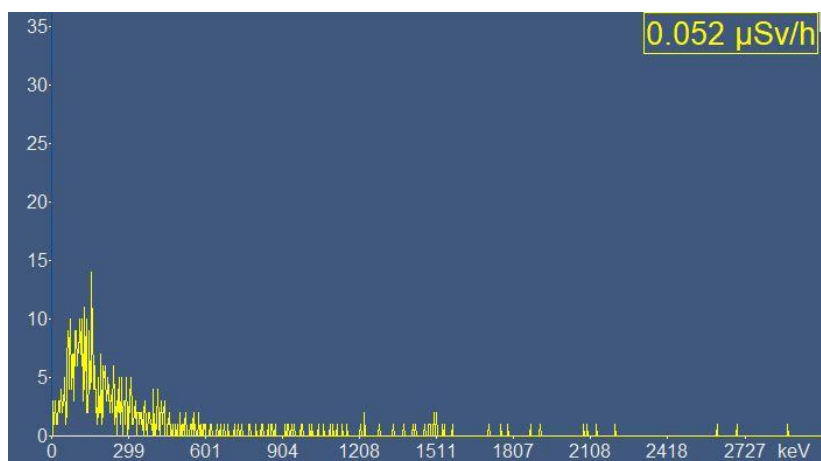


Figura B 18 - Espectro ponto 18

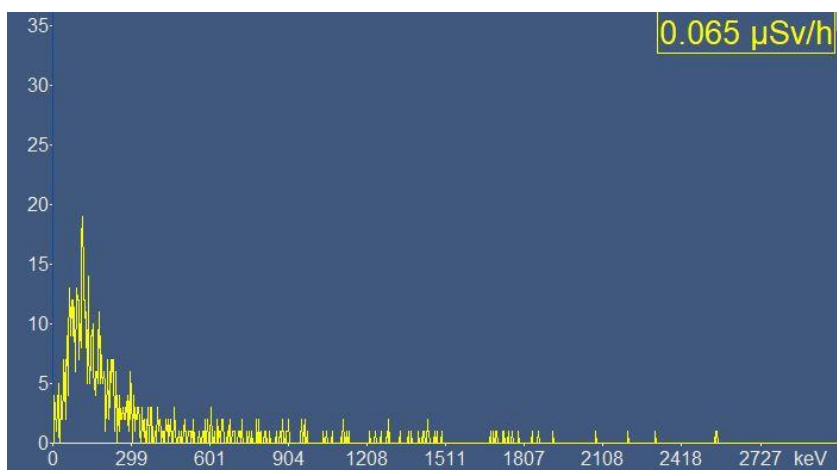


Figura B 19 - Espectro ponto 19

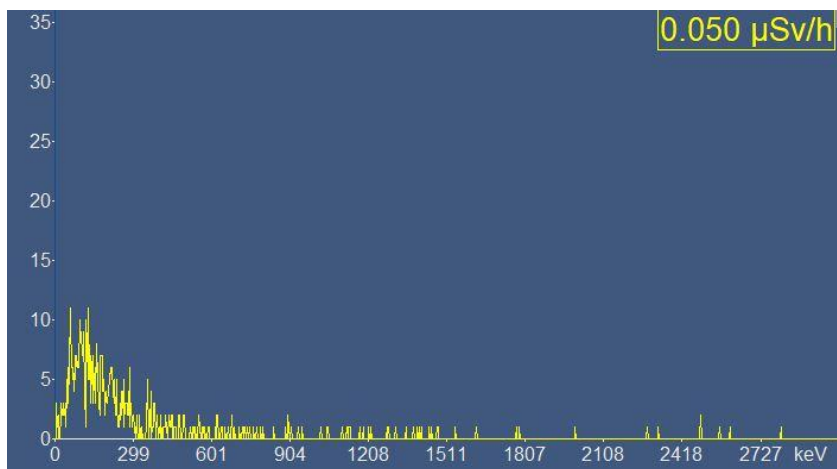


Figura B 20 - Espectro ponto 20

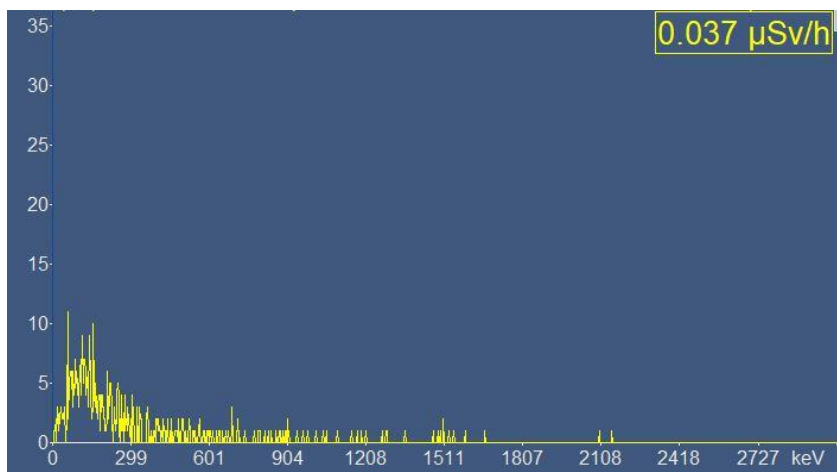


Figura B 21 - Espectro ponto 21

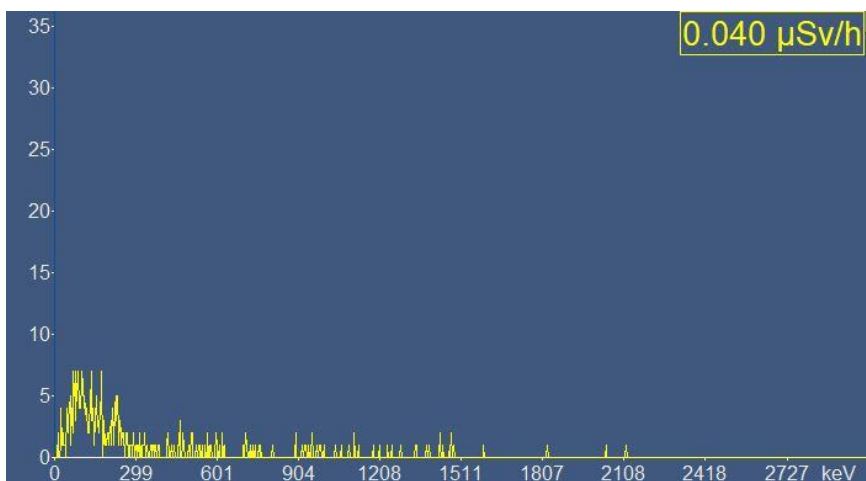


Figura B 22 - Espectro ponto 22

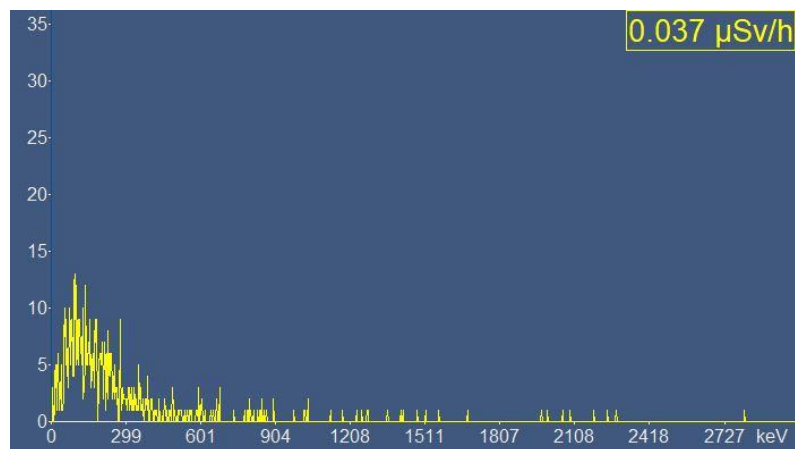


Figura B 23 - Espectro ponto 23

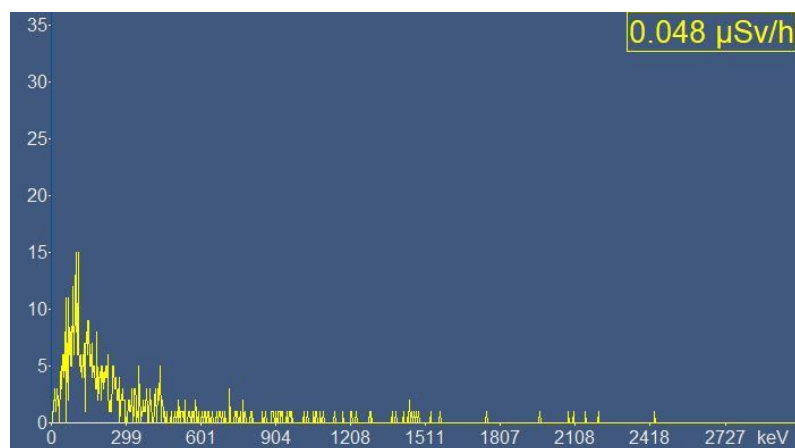


Figura B 24 - Espectro ponto 24

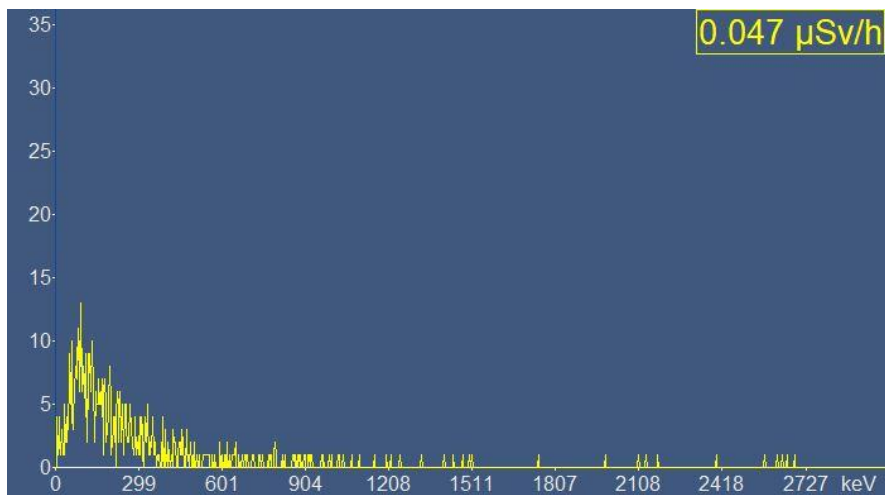


Figura B 25 - Espectro ponto 25

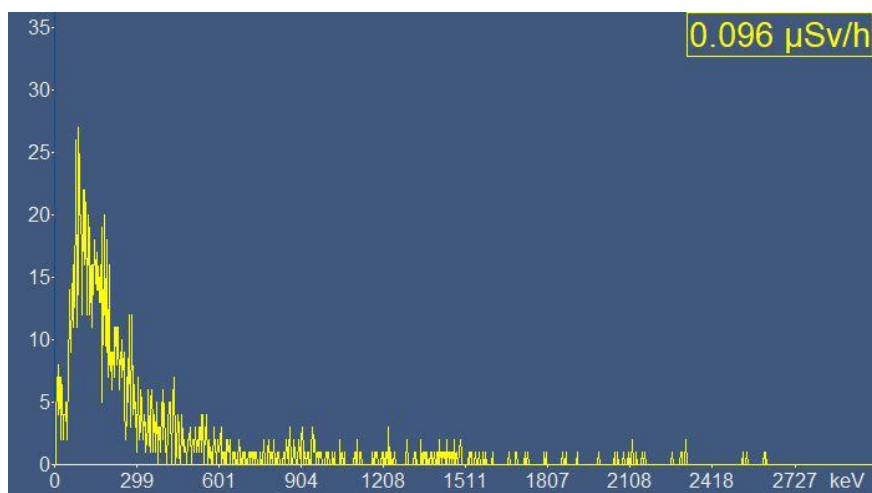


Figura B 26 - Espectro ponto 26

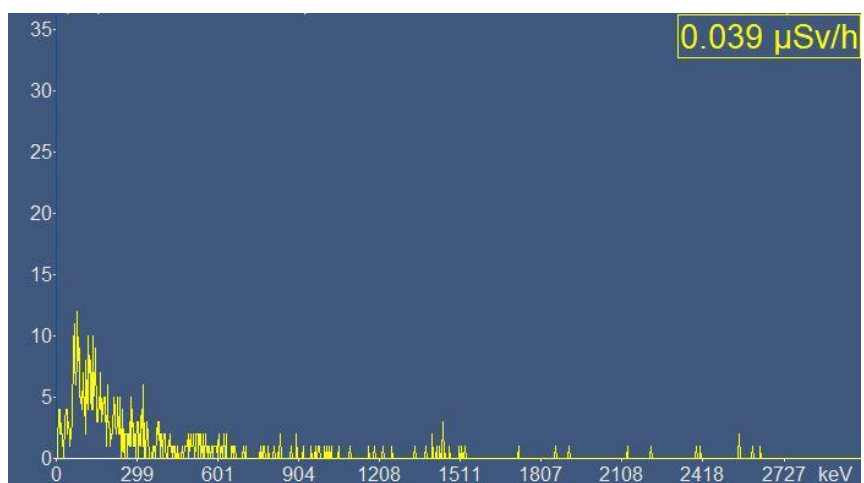


Figura B 27 - Espectro ponto 27

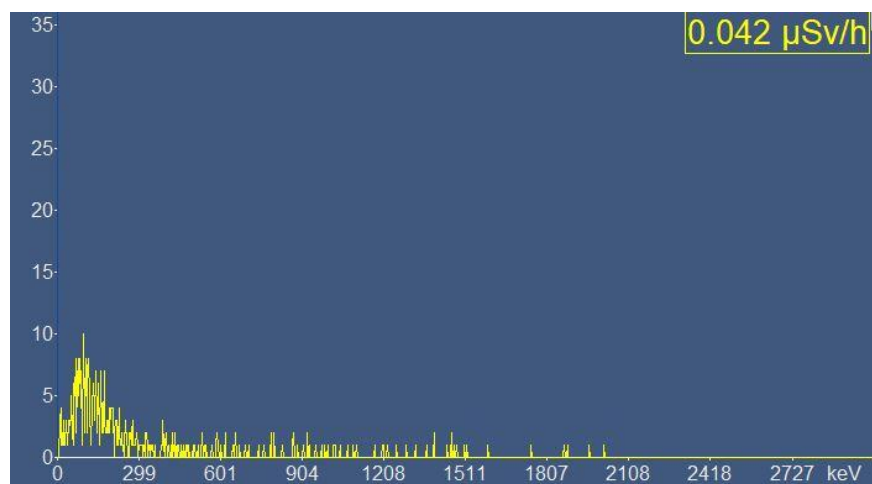


Figura B 28 - Espectro ponto 28

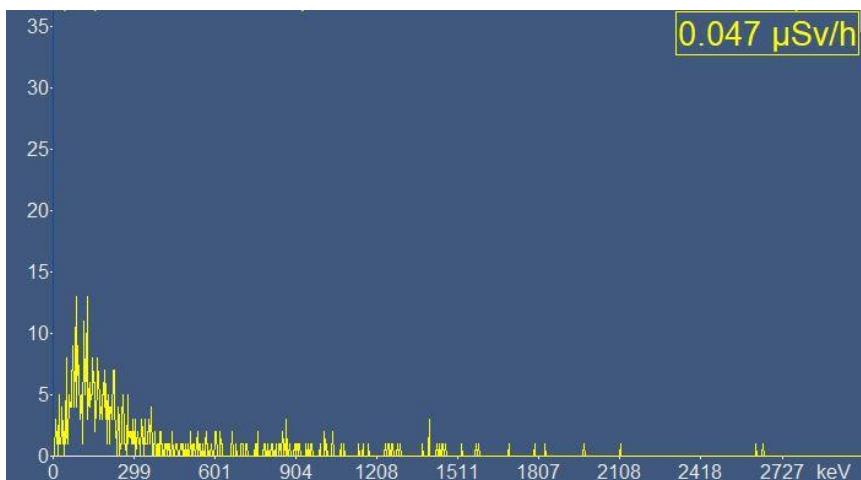


Figura B 29 - Espectro ponto 29

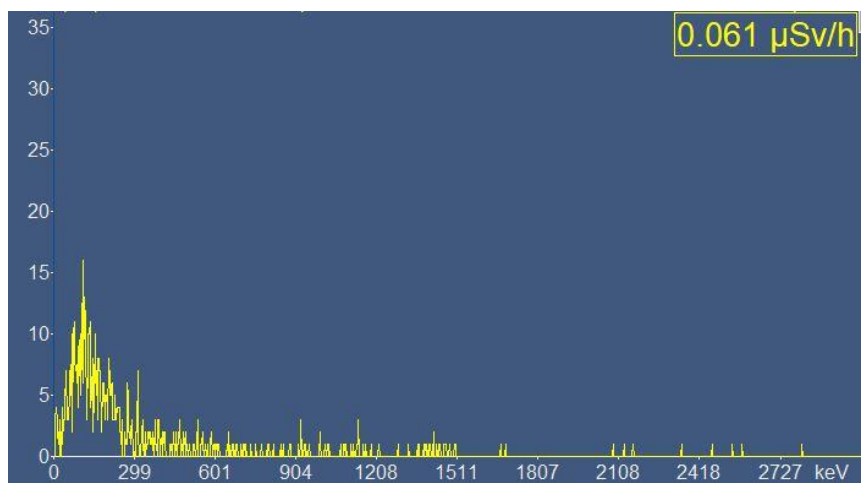


Figura B 30 - Espectro ponto 30

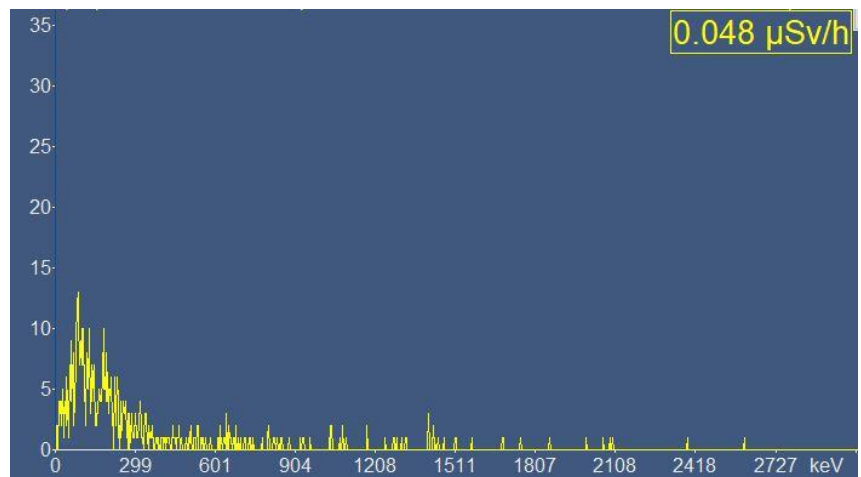


Figura B 31 - Espectro ponto 31

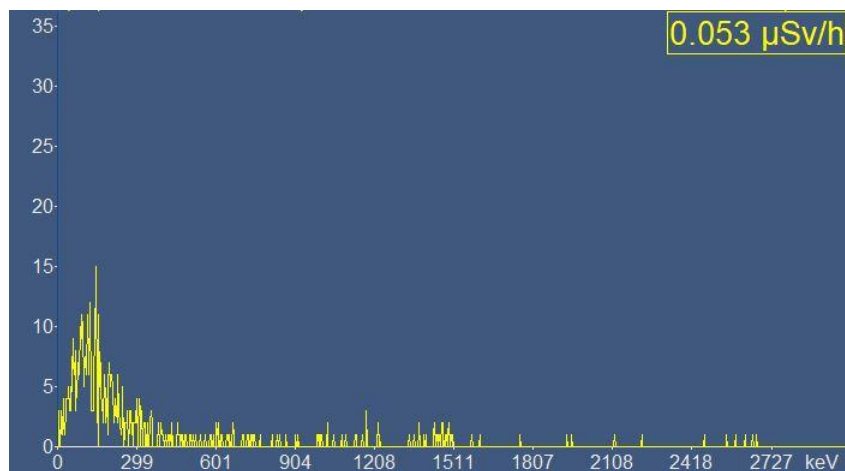


Figura B 32 - Espectro ponto 32

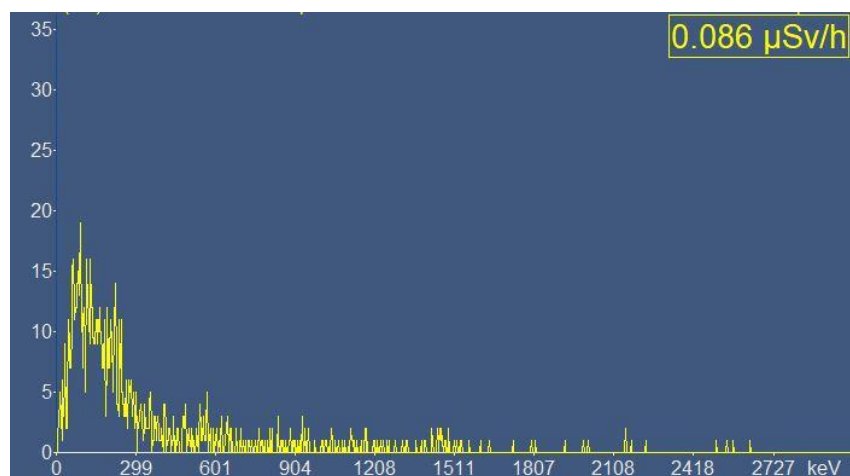


Figura B 33 - Espectro ponto 33

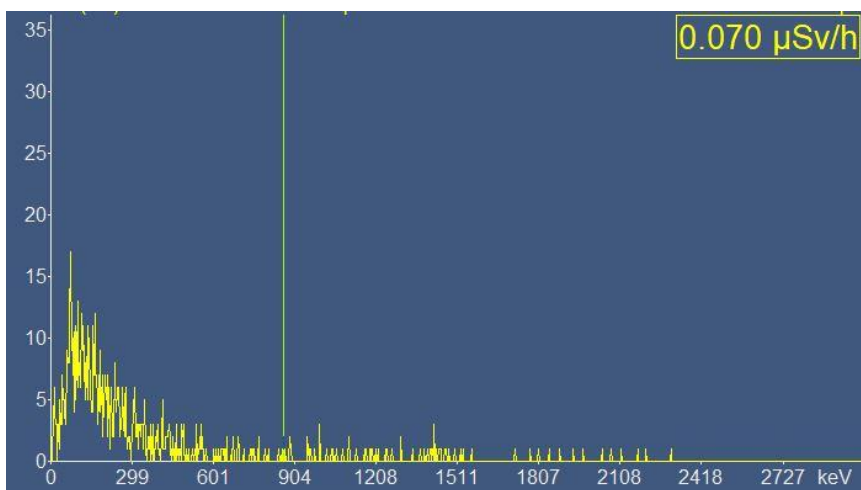


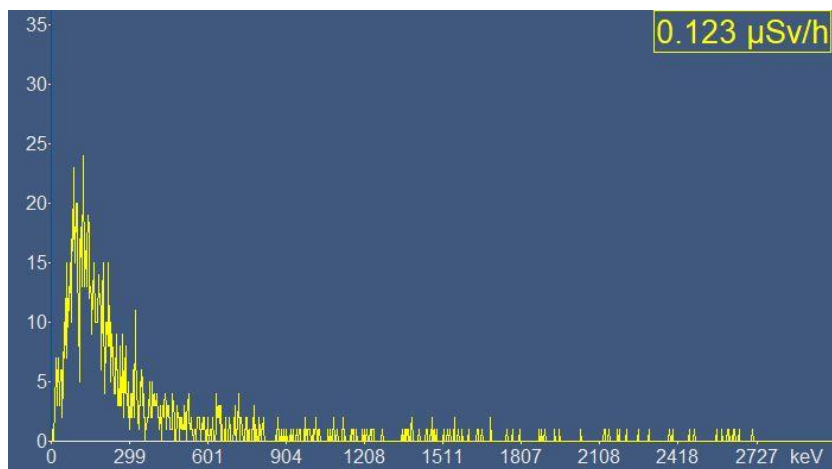
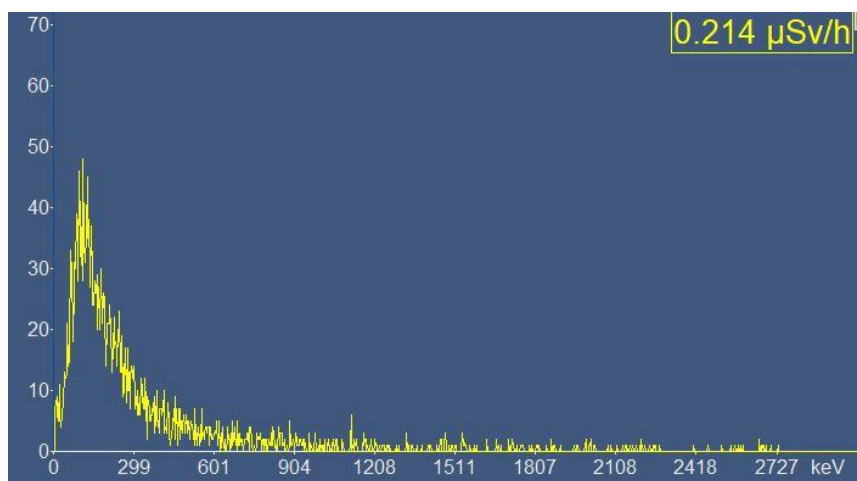
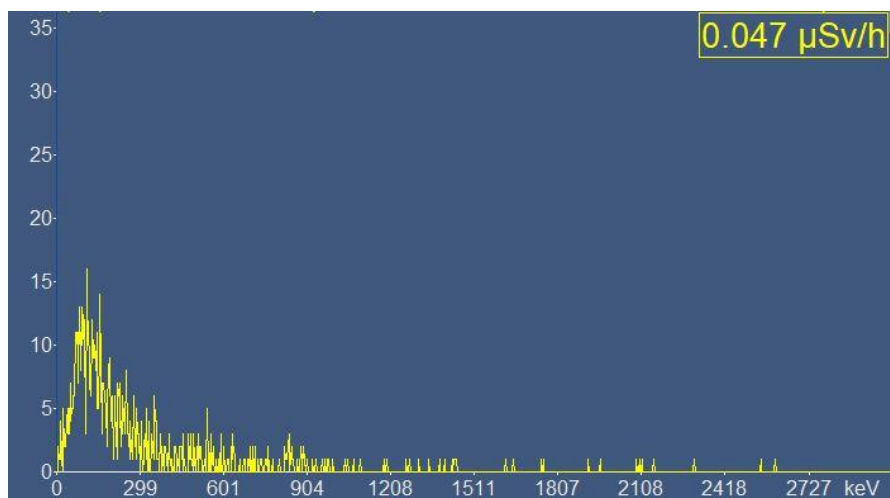
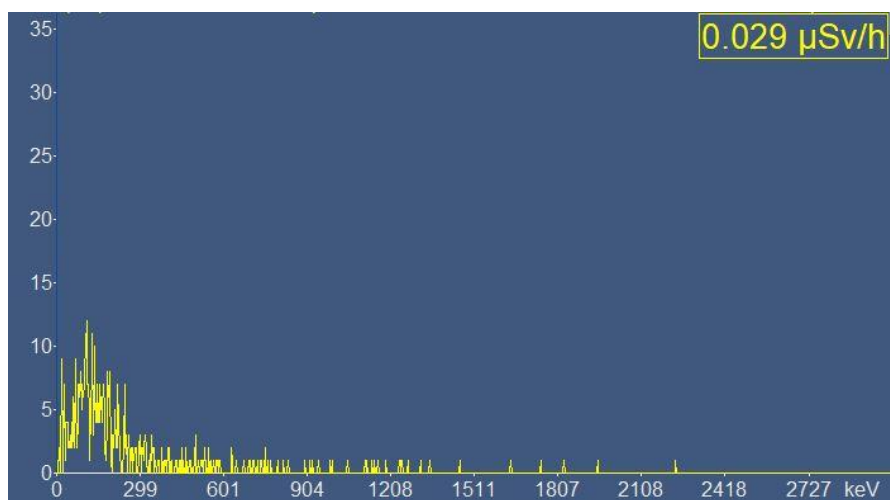
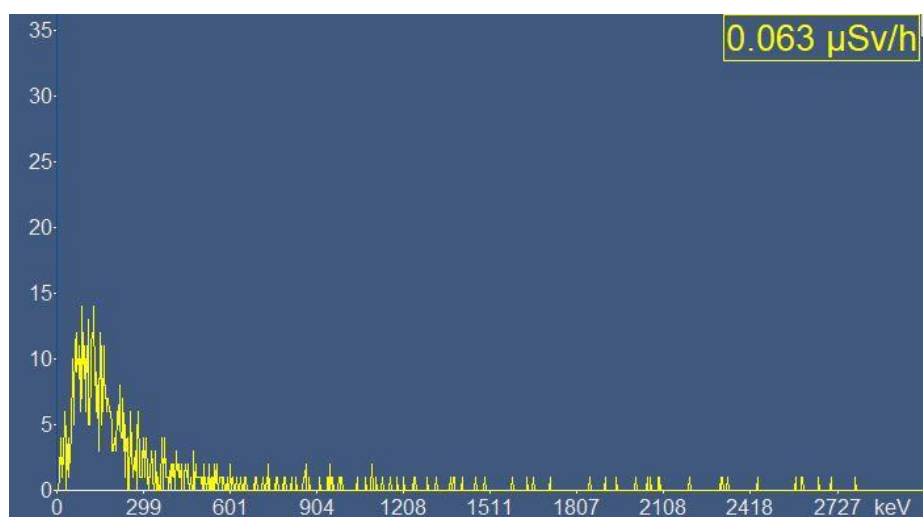
Figura B 34 - Espectro ponto 34*Figura B 35 - Espectro ponto 35**Figura B 36 - Espectro ponto 36*

Figura B 37 - Espectro ponto 37*Figura B 38 - Espectro ponto 38**Figura B 39 - Espectro ponto 39*