



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

DOSE EFETIVA COMPROMETIDA E ESTIMATIVA DO RISCO DE CÂNCER
DEVIDO A INGESTÃO DE ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra E ^{228}Th EM CONDIMENTOS

LEANDRO BARBOSA DA SILVA

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro

Março 2018

DOSE EFETIVA COMPROMETIDA E ESTIMATIVA DO RISCO DE CÂNCER
DEVIDO A INGESTÃO DE ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra E ^{228}Th EM CONDIMENTOS.

LEANDRO BARBOSA DA SILVA

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NUCLEAR.

Examinado por:

Prof. Ademir Xavier da Silva (UFRJ), D. Sc.

Prof. Alessandro da Cruz Gonçalves (UFRJ), D. Sc.

Prof. Francisco José de Oliveira Ferreira (IEN), D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Silva, Leandro Barbosa

DOSE EFETIVA COMPROMETIDA E ESTIMATIVA DO RISCO DE CÂNCER DEVIDO A INGESTÃO DE ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra E ^{228}Th EM CONDIMENTOS / Leandro Barbosa da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2018.

IX, 41 p.: il.; 29,7cm

Orientadores: Ademir Xavier da Silva

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/Programa de Engenharia Nuclear, 2018.

Referência Bibliográfica: p. 37-39

1. Detecção de radiação gama. 2. HPGe. 3. LabSOCS. 4. Ingestão anual de radionuclídeos. 5. Calculo do Risco de Câncer. I. Silva, Ademir Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Resumo do projeto de graduação apresentado à ESCOLA POLITÉCNICA/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

DOSE EFETIVA COMPROMETIDA E ESTIMATIVA DO RISCO DE CÂNCER
DEVIDO A INGESTÃO DE ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra E ^{228}Th EM CONDIMENTOS.

Leandro Barbosa da Silva

Março/2018

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Curso: Engenharia Nuclear

Os condimentos apresentam concentrações variáveis de radioatividade, segundo as características do solo, práticas agrícolas, etc. A ingestão é uma via de fácil exposição ao ser humano, por isso os condimentos devem ser monitorados, e se resultados apontarem uma possível atuação dos órgãos competentes, pode-se evitar consequências indesejáveis. Este trabalho apresenta uma análise de concentrações específicas de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th em alguns condimentos utilizando espectrometria gama de alta resolução. O ^{40}K , presente em todas as amostras, apresentou a maior concentração em Cheiro Verde com valor de (1288 ± 65) Bq/kg e a Pimenta do Reino apresentou a maior concentração para ^{228}Th com (33.9 ± 3.2) Bq/kg. Entre as amostras analisadas, apenas o tempero sírio mostrou quantidade mensurável de ^{137}Cs , $(6,1 \pm 1,1)$ Bq/kg.

Palavras chaves: Concentração específica

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

EFFECTIVE DOSE COMPROMISED AND ESTIMATED OF THE RISK OF CANCER DUE TO THE INTAKE OF ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra AND ^{228}Th IN CONDIMENTS.

Leandro Barbosa da Silva

Março/2018

Advisors: Ademir Xavier da Silva

Course: Nuclear Engineer

Spices have varying concentrations of radioactivity, depending on soil characteristics, agricultural practices, etc. Ingestion is a route of easy exposure to humans, so condiments should be monitored, and if results indicate a possibility of atuation by the protective agency, undesirable consequences can be avoided. This work presents an analysis of specific concentrations of ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{228}Th in some spices using high resolution gamma spectrometry. The ^{40}K , present in all samples, presented the highest concentration in cheiro verde with a value of (1288 ± 65) Bq / kg and the black pepper presented the highest concentration for ^{228}Th with (33.9 ± 3.2) Bq / kg. Among the analyzed samples, only the Syrian seasoning showed a measurable amount of ^{137}Cs , $(6,1 \pm 1,1)$ Bq / kg).

Key words: specific concentrations

Sumário

CAP. 1- INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Justificativa	2
CAP. 2 - REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 Radioatividade.....	5
2.1.1 Radioatividade Natural.....	6
2.1.2 Potássio-40 (40k)	6
2.2 Lei do Decaimento Radioativo:.....	7
2.3 Atividade específica	10
2.4 Dose Absorvida(D)	11
2.6 Radiação natural de fundo.....	13
2.7 Radioatividade Artificial	15
2.8 Radionuclídeos em Alimentos	16
2.9 Efeito Biológico da Radiação.....	17
2.10 Espectrometria Gama	18
CAP. 3 - METODOLOGIA	20
3.1 Características do HPGE.....	20
3.2. Eficiência de detecção	21
3.3 Preparações das amostras	23
3.4 Calculo de dose Efetiva Comprometida.....	25
3.5 Calculo do Risco de Câncer ao longo da Vida (Rc).....	26
CAP. 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 Curvas de ajustes.....	27
4.2 Condimentos	28
4.3 Dose Efetiva Total e Risco de Câncer.....	31
CAP. 5 - CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

Lista de Figuras

Figura 1. Ilustração representativa do esquema de um átomo radioativo (COUTO, 2010).....	5
Figura 2. Esquema de decaimento do potássio 40.....	7
Figura 3. Número $N(t)$ de núcleos que ainda não decaíram em função do tempo t	8
Figura 4. Dose individual média anual decorrente de fontes naturais e artificiais (IPEN, 2017) 14	
Figura 5. Dose individual média anual decorrente de fontes naturais (IPEN, 2017).	15
Figura 6. Descreve o ciclo de incorporação de radionuclídeos até a absorção pelo homem (MELQUIADES, 2004)	17
Figura 7. Espectrômetro utilizado: Em (a) observa-se o dewar com capacidade de trinta litros. Em (b) a blindagem do detector com baixo fundo de radiação de 10 cm de chumbo de recoberta de 1 mm de estanho. Em (c) O multicanal DSA 1000. Em (d) o espectro de uma amostra na tela do computador.....	21
Figura 8. Espectro e curva de eficiência gerados com o uso de fonte padrão produzida pelo LNMRI – IRD/CNEN.....	22
Figura 9: Visualização gráfica do Geometry Composer. Em (a) pode-se observar o gabarito da geometria a ser modelada. Em (b) a matriz da caixa de diálogo onde deve ser inserido as dimensões do becker, como proposto em (a). Em (c) o resultado visual das inserções.	23
Figura 10. Ajuste em energia para espectrometria gama.	28

Lista de Tabelas

Tabela 1. Produtos iniciais e finais das séries radioativas (Burcham, 1974).	6
Tabela 2. Níveis, limites e referências de dose de radiação para uma comparação simplificada (CNEN, 2018).	12
Tabela 3. Componentes da radiação ionizante natural na dose efetiva anual (UNSCEAR, 2000):	13
Tabela 4. Características do HPGE	20
Tabela 5.: Determinação coeficiente de dose publicado pela ICRP 2012.....	25
Tabela 6. Pontos experimentais utilizado para ajuste quadrático em energia	27
Tabela 7. Concentração de Atividade Específica nos Condimentos em (Bq/kg)	28
Tabela 8. Valores de referência para dose efetiva comprometida (UNSCEAR, 2000).....	31
Tabela 9. Dose efetiva para ingestão para membros do público em $\mu\text{Sv}/\text{ano}$ e Rico de Câncer por ano.....	31

CAP. 1- INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A radioatividade da matéria é um fenômeno natural e toda forma de vida está exposta a certa quantidade de radiação ionizante. Essa radiação é também chamada de *background* ou radiação de fundo, devido à presença de elementos radioativos na natureza (solo, água e ar). Os radionuclídeos de maior contribuição ao *background* são o potássio 40 (^{40}K) e aqueles pertencentes às séries do urânio 238 (^{238}U) e do tório 232 (^{232}Th), e com menor importância, a série do urânio 235 (^{235}U). Como a radioatividade é um fenômeno natural e comum da matéria, o ser humano também é radioativo.

Um homem adulto possui uma atividade média de 7000 Bq, enquanto 1 kg de café possui uma atividade média de 1000 Bq. Já 1 kg de urânio possui atividade de 25.000.000 Bq (HEILBRON FILHO *et al.*, 2004). As maiores concentrações de radionuclídeos presentes no corpo humano são o potássio 40 (^{40}K), carbono 14 (^{14}C), tório e urânio, e a principal via de incorporação destes elementos é através da ingestão de alimentos, aos quais os condimentos estão incluídos. As ações humanas também podem alterar a concentração de radioatividade ao introduzir radionuclídeos artificiais em determinados ambientes. O conhecimento dos níveis de radioatividade que as formas de vida estão expostas, dentre elas o ser humano, é de grande valia para a avaliação dos impactos causados pela dose de radiação ionizante absorvida no cotidiano. Visando a proteção do ser humano, foram criadas no século XX organizações de proteção radiológica com o objetivo de criar normas e produzir diretrizes limitando o uso de radiação ionizante.

A maior preocupação dos órgãos de controle e licenciamento de radiação ionizante, entre eles, a IAEA (*International Atomic Energy Agency*) e a CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), têm sido a exposição externa devido à radiação gama. Neste contexto, os detectores mais utilizados nos estudos de qualificação e quantificação dos níveis de radiação gama, têm sido o detector de iodeto de sódio ativado com tálio [NaI(Tl)] e o detector de germânio hiper puro – HPGe (JÚNIOR *et al.*, 2009). A técnica de espectrometria gama tornou-se uma excelente alternativa na análise de radionuclídeos em amostras ambientais e é utilizada pela maioria dos

laboratórios que trabalham com certificação de concentração de radionuclídeos em diversos tipos de amostras (MALANCA *et al.*, 2000). Uma das principais vantagens desta técnica é a quantidade de informações obtidas em uma única análise, como a identificação dos radionuclídeos presentes na amostra bem como a estimativa da atividade específica. Além disso, a espectrometria gama é uma técnica de análise rápida, não destrutiva e sem a necessidade de tratamento químico.

Segundo os dados do IBGE (2015), a cidade do Rio de Janeiro é a segunda cidade mais populosa do Brasil com cerca de 6,52 milhões de habitantes, o comércio local oferece uma grande diversidade de condimentos nacionais e importados.

1.2 Justificativa

A AIEA (Agencia Internacional de Energia Atômica) criada em 1957 estabelece recomendações e normas de segurança para a proteção da saúde e minimização de perigo para a vida e propriedade, além de prever a aplicação destas normas. Seguindo esse caminho a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), organismo não governamental independente criado em 1928, divulga as suas recomendações que envolvem aspectos relacionados à proteção radiológica e aos riscos associados às radiações ionizantes sob a forma de relatórios, denominados Publicações ICRP (ICRP, 2007; LAW, 2012; DA SILVA *et al.*, s.d.). Estas recomendações tratam das radiações ionizantes, à proteção do Homem e ao meio ambiente, servindo de orientação de caráter prático ao conhecimento de radiobiologia e radioproteção (PEREIRA & KELECON, 2011) para agências reguladoras, grupos de gerenciamento e profissionais na área de radioproteção.

No Brasil, as Normas Básicas de Proteção Radiológica (NBPR) foram aprovadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em 1973 adotando os Princípios de Proteção Radiológica e os limites de dose seguindo as recomendações da ICRP. No início do ano de 2005, a CNEN aprovou a Norma CNEN-NN-3.01, sob o título Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, juntamente com as Posições Regulatórias, em substituição a Norma CNEN-NE-3.01, sendo atualizada pela Resolução CNEN 164/2014 (CNEN, 2014a). Esta norma foi baseada nas recomendações da Publicação ICRP 26 de 1977, que introduziu o conceito de detrimento associado à probabilidade de ocorrência de danos causados pelas radiações e estabeleceu os Princípios de Proteção

Radiológica: Justificação, Otimização e Limitação de Dose (TAUHATA et al., 2014). A presente Norma é baseada nas recomendações da Publicação ICRP 60. Além disso, os três Princípios de Proteção Radiológica foram denominados requisitos (TAUHATA et al., 2014; XAVIER & HEILBRON, 2014a).

Foi realizada uma busca bibliográfica a fim de verificar publicações ligadas a radioatividade em condimentos. Observou-se poucas publicações ligadas a esse tema, porém nenhuma delas no Brasil. Logo pensou-se em se fazer a primeira no Estado do Rio de Janeiro.

As características radiométricas dos alimentos variam devido ao solo onde são cultivados as frutas, os legumes, as verduras, os cereais, etc. Devido a essa variedade de composição radiométrica dos alimentos a verificação da radioatividade presente nos alimentos é importante, pois dependendo do nível da dose efetiva comprometida, que está diretamente ligada à concentração de atividade dos radionuclídeos presentes, e à taxa de ingestão anual do alimento, pode ocasionar algum tipo de efeito deletério ao organismo.

Portanto, tomando como base as informações sobre condimentos, e levando em conta a sua taxa de consumo, surgiu o interesse de verificar os traços radioativos presentes nessa especiaria. Nesse sentido, este trabalho vai possibilitar a análise radiométrica para radioatividade natural em condimentos, utilizando técnicas de medidas nucleares para estudos em radioproteção ambiental, a fim de elaborar trabalhos que futuramente contribuirão para o controle ambiental e os cuidados com a saúde humana.

Conforme levantamento efetuado ao longo de 2012 pela Food Service Consultoria Especializada (SEBRAE-10/06/2015), considerando a tendência mundial do consumo de alimentos, os temperos apresentam forte potencial de crescimento nos próximos anos, uma vez que é expressiva a valorização da gastronomia e da harmonização entre alimentos e bebidas, além da valorização de ingredientes regionais. Considerando apenas o segmento de pimentas, o consumo médio brasileiro ainda é considerado baixo, de 0,5 gramas por dia, enquanto no México é de 8 gramas por dia. Já o mercado de ervas e temperos orgânicos mostra-se atualmente com uma taxa média de crescimento em torno de 30% anuais, enquanto o mercado convencional cresce a cerca de 2% ao ano.

1.3 Objetivo

O objetivo do presente estudo é usar a espectroscopia gama para determinar a concentração de atividade dos radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th presentes em alguns condimentos incluídos na dieta da população do Rio de Janeiro, estimar a dose efetiva comprometida e o risco de câncer devido a estes radionuclídeo e comparar com os valores de literatura encontrados.

CAP. 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Radioatividade

Define-se radioatividade como sendo a emissão espontânea de radiação corpuscular e eletromagnética pelo núcleo que se encontra num estado excitado de energia, i.e., emissão de partículas e/ou fótons para alcançar a estabilidade, ou seja, a radioatividade pode, portanto, ser definida como um processo no qual um radionuclídeo sofre uma desintegração espontânea, liberando certa quantidade de radiação e formando um núcleo novo (YOUNG e FREEDMAN, 2009), tal como ilustrado na Figura 1. Assim, essas partículas ou ondas eletromagnéticas são chamadas radiação, enquanto que o direcionamento destas partículas emitidas sobre um alvo (alimento, células cancerígenas, etc...) é chamado irradiação.

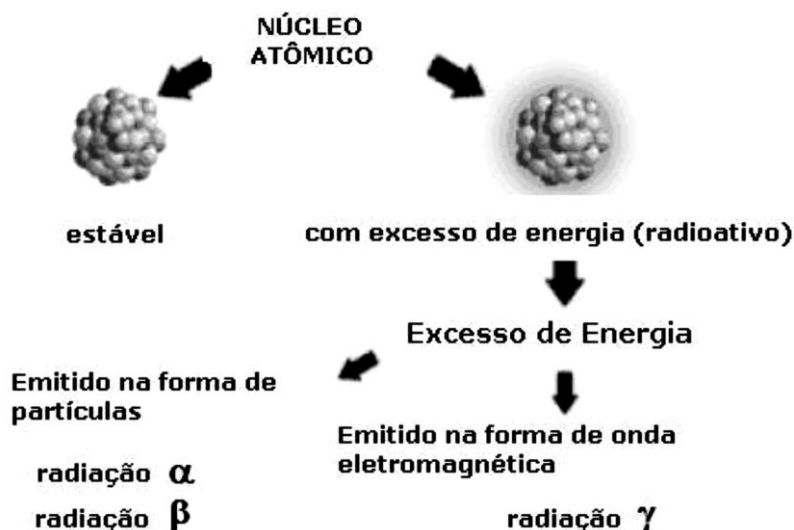


Figura 1. Ilustração representativa do esquema de um átomo radioativo (COUTO, 2010).

A unidade no Sistema Internacional de Unidades para radioatividade é o Becquerel (Bq) e equivale a 1 desintegração/segundo. A unidade Curie (Ci), que corresponde a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo, não é do sistema internacional, mas também é empregada. O nome desta unidade foi originalmente atribuído, em homenagem a Pierre Curie (YOUNG e FREEDMAN, 2009).

2.1.1 Radioatividade Natural

Na Tabela 1, estão relacionadas às quatro séries radioativas, seus núcleos iniciais, finais e seu número de massa.

Tabela 1. Produtos iniciais e finais das séries radioativas (Burcham, 1974).

Nome da série	Número de massa	Inicial	Período	Final
Tório	$4n$	^{232}Th	$1,4 \times 10^{10}$ anos	^{208}Pb
Netúnio	4_{n+1}	^{237}Np	$2,2 \times 10^6$ anos	^{209}Bi
Urânio	4_{n+2}	^{238}U	$4,5 \times 10^9$ anos	^{206}Pb
Actínio	4_{n+3}	^{235}U	$7,2 \times 10^8$ anos	^{207}Pb

A série do ^{235}U é a menos frequentemente detectada devido à pequena porcentagem deste isótopo na natureza (em uma amostra de urânio natural, **99,27%** é constituída pelo ^{238}U , e apenas 0,711% pelo ^{235}U) e o decaimento dos núcleos destas séries ocorrem preferencialmente por emissão de partículas alfa e/ou beta. A série do Netúnio não pode mais ser observada na natureza, pois este elemento tem meia-vida menor que a idade da Terra.

2.1.2 Potássio-40 (^{40}K)

Essencialmente o potássio 40 (K-40) está presente em todas as amostras ambientais (GARCÊZ, 2016) possuindo três isótopos naturais dos quais o potássio 39 (estável) tem abundância natural de aproximadamente 93,26%, o potássio 40 (radioativo) tem abundância natural de aproximadamente 0,012% (0,0118%), e o potássio 41 (estável) tem abundância isotópica de aproximadamente 6,73%. O potássio é o sétimo elemento mais comum no solo, e a concentração média devido ao potássio 40 é de 850 (Bq/kg). Segundo a (GARCÊZ, 2016) o potássio 40 ($^{40}_{19}\text{K}$) decai para o cálcio 40 ($^{40}_{20}\text{Ca}$) via decaimento β^- em 89,3% das vezes, emitindo um elétron cuja energia máxima é de 1,314 MeV. Também há uma pequena possibilidade (0,001%) de ele decair por

decaimento β^+ emitindo um pósitron cuja energia máxima é de 1,505 MeV, e o restante, aproximadamente 10,7%, decairão via captura de elétrons, em um estado excitado do argônio ($^{40}_{18}\text{Ar}$), este por sua vez chegará ao estado fundamental emitindo um fóton característico de energia 1460,8 keV (Figura 2).

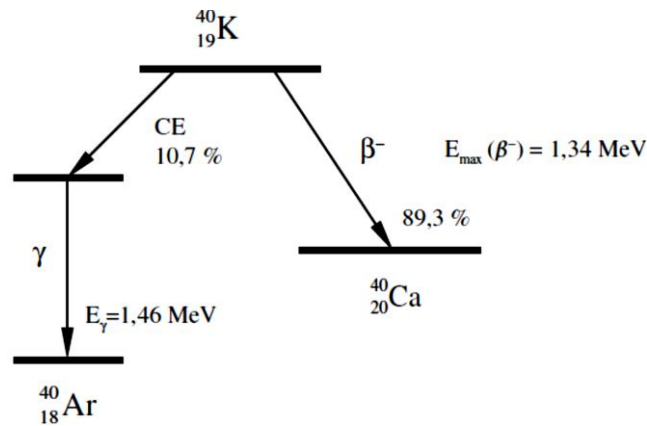


Figura 2. Esquema de decaimento do potássio 40

2.2 Lei do Decaimento Radioativo:

Esta lei fornece a previsão do número de núcleos de uma dada amostra radioativa, que ainda não decaíram, e vice-versa, dentro de um intervalo de tempo. Por exemplo, seja $N(t)$ o número de núcleos de uma amostra radioativa, os quais ainda não decaíram, ou seja, ainda estão excitados, num certo instante t . Temos, então, que o número de núcleos que decaem no intervalo de tempo entre t e $t + \Delta t$, deve ser proporcional a $N(t)$ e a Δt , o que se escreve como $-\Delta N(\Delta t) = \lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t$. A constante de proporcionalidade λ é uma constante que equivale à probabilidade de decaimento por unidade de tempo. O sinal negativo no termo $-\Delta N(\Delta t)$ indica a diminuição de núcleos em relação ao número $N(t)$ da amostra inicial. Esta equação diz que se contarmos o número $N(t)$ em vários instantes de tempo e traçarmos um gráfico, o resultado seria o apresentado na Figura 3.

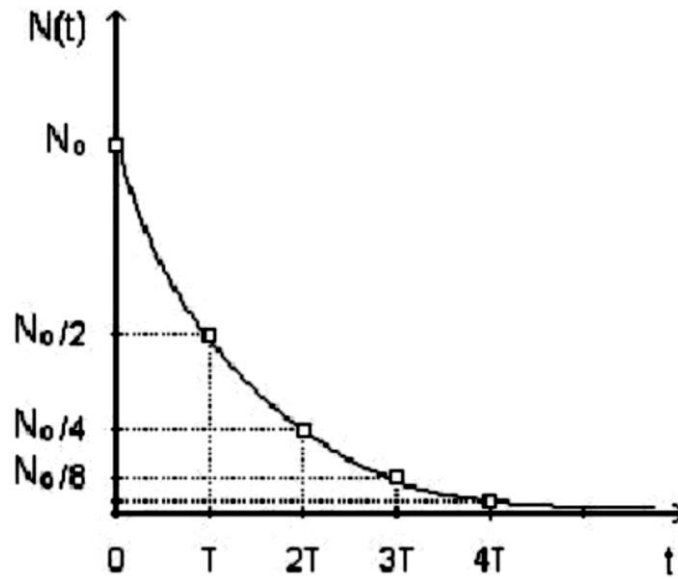


Figura 3. Número $N(t)$ de núcleos que ainda não decaíram em função do tempo t

O número de desintegrações nucleares por unidade de tempo é proporcional à quantidade de material radioativo na amostra (massa ou número de átomos). Simbolicamente, fica:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

Integrando-se a equação descrita acima se obtém uma expressão de N em função do tempo.

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt$$

$$\ln N = -\lambda t + C$$

A constante de integração, C , pode ser calculada se considerarmos que num tempo $t = 0$, $N = N_0$

$$\ln N_0 = C$$

Finalmente, fazendo as substituições devidas, obtém-se a expressão:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Onde: $N_0 = N(t = 0)$ e $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2} \text{fis}}$

A meia-vida física do Elemento ($T_{1/2}$) é o tempo que leva para um elemento radioativo ter sua atividade reduzida à metade da atividade inicial, ou seja, para cada meia-vida que passa, a atividade radioativa vai sendo reduzida à metade da anterior, até atingir um

valor insignificante que não permite mais distinguir suas radiações daquelas provenientes do meio ambiente. Isso permite acompanhar a duração (ou a “vida”) de um elemento radioativo. A este processo, dá-se o nome de decaimento radioativo nuclear, ou simplesmente decaimento nuclear. Simbolicamente:

$$N = \frac{1}{2} N_0 \text{ e } t = T_{\frac{1}{2}fis}$$

Substituindo-se estes valores na equação de decaimento radioativo obtém-se:

$$\ln \frac{N_0}{2} - \ln N_0 = \lambda T_{\frac{1}{2}fis}$$

$$T_{\frac{1}{2}fis} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (3)$$

A meia-vida física de um radionuclídeo está diretamente relacionada com os possíveis efeitos deletérios da radiação. Enquanto, a meia vida biológica é o tempo necessário para que metade da concentração de um elemento presente no organismo seja eliminado, por processos químicos ou físicos. Um radionuclídeo com uma meia-vida da ordem de anos pode causar efeitos em longo prazo e se dispersar pelos vários compartimentos do ecossistema. Porém isso não significa que isótopos de meia-vida curta não sejam prejudiciais, pois, uma quantidade comparável (N) de um isótopo de meia-vida curta pode liberar tanta radioatividade quanto outro isótopo de meia-vida longa, embora por um período mais curto. Esta situação pode ser crítica para um determinado órgão, pois os efeitos da radiação são mais severos se a dose for liberada rapidamente.

A Meia Vida Efetiva do elemento quantifica o intervalo de tempo para que a concentração de um dado material radioativo decaia pela metade no corpo humano. A

meia-vida efetiva $\left(\frac{1}{T_{\frac{1}{2}eff}}\right)$ é uma composição entre a meia-vida física $\left(\frac{1}{T_{\frac{1}{2}fis}}\right)$ de um dado

radioisótopo e a meia-vida biológica $\left(\frac{1}{T_{\frac{1}{2}biol}}\right)$, de acordo com a Equação 4. (SCHEIBEL,

2007).

$$\frac{1}{T_{\frac{1}{2}eff}} = \frac{1}{T_{\frac{1}{2}fis}} + \frac{1}{T_{\frac{1}{2}biol}} \quad (4)$$

2.3 Atividade específica

Grandeza importante quando se deseja estudar o comportamento ambiental de um radionuclídeo assim como seus efeitos biológicos, definida como a razão entre a atividade e a massa de material que da origem a essa radioatividade é proporcional ao número de átomos radioativos. A taxa de desintegrações nucleares é definida como o produto da constante de decaimento pelo número de átomos.

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (5)$$

Onde A_0 = atividade inicial do elemento radioativo.

A = atividade do elemento radioativo

λ = constante de desintegração característica do material radioativo

t = tempo decorrido

O número de átomos radioativos N em uma amostra de um radionuclídeo específico é dado por:

$$N = \frac{m N_A}{A} \quad (6)$$

onde m é a massa da substância em gramas, N_A é o número de Avogadro ($6,025 \times 10^{23} \frac{\text{átomos}}{\text{mol}}$) e A é o peso atômico do radionuclídeo em $\frac{\text{gramas}}{\text{mol}}$. Fazendo-se as substituições necessárias obtém-se:

$$A = 0,693 m \frac{N_A}{T_{1/2} A}$$
$$\frac{A}{m} = 0,693 \frac{N_A}{T_{1/2} A} \quad (7)$$

Onde: $\frac{A}{m}$ é a atividade específica do radionuclídeo em questão.

2.4 Dose Absorvida(D)

É a quantidade de energia absorvida por massa de tecido e a unidade de medida é o Gray (Gy). Um Gray corresponde a 100 rad na unidade antiga e a 1 J.Kg^{-1} no sistema internacional.

$$D = \frac{d\epsilon}{dm} \quad (7)$$

Entretanto, esta grandeza não explicita se a dose foi produzida por radiação alfa (muito mais deletéria) ou radiação beta ou gama e, portanto, não pode inferir os efeitos biológicos que poderiam advir desta absorção. Por essa razão, as doses devem ser ponderadas em termos da potencialidade de produzir dano que cada tipo de radiação apresenta, vinte vezes maior para a radiação alfa do que para as outras. Esta dose ponderada denomina-se “dose equivalente” (H), definida pelo produto de $D.Q$, onde D é dose absorvida média no órgão ou tecido e Q é o fator de qualidade da radiação.

$$H = D.Q \quad (8)$$

O fator de qualidade Q representa a transferência linear de energia, L, de partículas carregadas num meio e é definida como o quociente de $\frac{dE}{dl}$, onde dl é a distância percorrida pela partícula e dE é a energia perdida pelas colisões. O valor de Q pode ser substituído pelo fator de ponderação da radiação, w_R , que é um número adimensional pelo qual a dose absorvida é multiplicada de forma a refletir a efetividade da radiação.

A dose equivalente é medida em *Sievert (Sv). Para a maioria das aplicações práticas, o fator de ponderação é 1, isto é, 1 sievert corresponde a 1 gray ($1 \text{ Sv}=100 \text{ rem}$, $1 \text{ rem} = 1 \text{ cJ/kg}$) onde *Sievert é uma unidade usada para medir o impacto da radiação sob o corpo humano.

De acordo com o Comitê Científico das Nações Unidas para os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR 1993), a radiação natural expõe uma pessoa, em média, a uma dose de 2,4 mSv por ano. O valor máximo de exposição à radiação recomendado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP 1990) para o público e para um profissional que trabalha com radiação ionizante é chamado de limite de dose. O limite de dose anual público é de 1mSv (1000 μSv) e, para os trabalhadores, a dose

limite é de 20 mSv por ano em uma média de 5 anos, sendo que por ano não pode ultrapassar 50 mSv.

Note que esse limite não inclui a exposição à radiação natural ou médica. A Tabela 2 mostra níveis, limites e referências de dose de radiação para uma comparação simplificada.

Tabela 2. Níveis, limites e referências de dose de radiação para uma comparação simplificada (CNEN, 2018).

PARÂMETRO	/ALOR (mSv)	OBSERVAÇÕES
Limite anual para público em situação operacional normal	1	Dose acima da radiação natural. Não inclui aplicações médicas. Ref.: Norma CNEN-NN-3.01.
Aplicações médicas (excluindo radioterapia)	0,03 a 2,0	Média anual Ref.: UNSCEAR 2008
Radiação natural	2,4	Média anual. Ref.: UNSCEAR 2008. Algumas regiões apresentam níveis até 5 vezes maiores, por exemplo, a cidade de Guarapari, ES.
Limite anual para indivíduo ocupacionalmente exposto (trabalhador)	20	Média em 5 anos. Não pode exceder 50 mSv em um único ano. Ref.: Norma CNEN-NN-3.01.
Nível de ação para evacuação de população em situações de emergência	50	Dose a ser evitada. Monitoração no local: taxa: 1 mSv/h. Ref.: Norma CNEN-NN-3.01 PR-006.
Limite de dose em situações de emergência para executar ações para prevenir o desenvolvimento de situações catastróficas	100	Com exceção das ações para salvar vidas. Ref.: Norma CNEN-NN-3.01.
Referência para aparecimento de efeitos observáveis	1.000	Os efeitos observados podem ser astenia, náuseas, vômitos.
Dose de corpo inteiro mais alta recebida por uma das vítimas do acidente radiológico em Goiânia, 1987	8.000	A vítima faleceu tempos depois.

2.5 Dose efetiva Comprometida (D_{ef})

Grandeza expressa por:

$$D_{ef} = \sum_T \cdot w_T \cdot H_T \quad (9)$$

É definida como a dose equivalente ponderada para expressar a sensibilidade dos diversos órgãos à exposição à radiação dado que certas partes do corpo são mais vulneráveis à radiação que outras.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) com o objetivo de limitar o risco de efeitos estocásticos, introduziu o conceito de limitação da exposição ponderada média no corpo inteiro que se baseia no princípio de que para certo nível de proteção,

o risco deve ser o mesmo se o corpo todo é irradiado uniformemente, ou se a irradiação é parcial ou não uniforme.

Onde: E é a dose efetiva, w_T é um fator que representa a proporção do risco devido a efeitos estocásticos resultantes no tecido ou órgão T , com relação ao risco total por efeitos estocásticos quando o corpo inteiro é irradiado uniformemente, H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão e Σ_T é o somatório. Quando não especificado de outra forma, tem o valor de 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para a incorporação por crianças.

2.6 Radiação natural de fundo

Os elementos radioativos que compõem *radiação de fundo* são responsáveis por uma dose de radiação ionizante comum a todos os seres vivos, a estimativa é que esta dose efetiva média mundial devido a esta radiação natural seja de $2,42 \text{ mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$ (UNSCEAR, 2000). A Tabela 3 mostra a média global da dose efetiva anual para adultos devido a fontes naturais de radiação ionizante.

Tabela 3. Componentes da radiação ionizante natural na dose efetiva anual (UNSCEAR, 2000):

Componente da exposição	Dose efetiva anual (mSv)
Raios cósmicos e radionuclídeos cosmogênicos	0,39
Radionuclídeos terrestres: exposição gama externa	0,48
Radionuclídeos no corpo: exposição interna (exceto radônio)	0,29
Radônio e filhos	1,26
Total	2,42

O total na Tabela 3 é referente a uma média, porque os valores de dose da radiação de fundo variam de lugar para lugar. Aproximadamente $2/3$ da dose equivalente efetiva recebida pelo homem decorrente das fontes naturais são provenientes de substâncias radioativas que se encontram no ar que respira, nos alimentos e água por ele consumidos. O homem recebe, em média, $180 \mu\text{Sv}/\text{ano}$ de ^{40}K incorporado juntamente

com o potássio não radioativo, que é um elemento essencial para o seu organismo. No entanto, a maior parte da dose provém dos radionuclídeos das séries naturais do ^{238}U e ^{232}Th .

A maior parte da dose de radiação recebida pela população mundial provém de fontes naturais mostrado na Figura 4, que vêm atingindo a superfície da Terra ao longo de toda a história da humanidade.

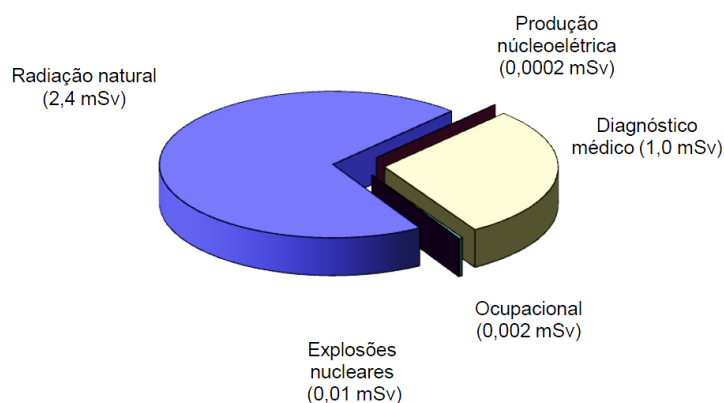


Figura 4. Dose individual média anual decorrente de fontes naturais e artificiais (IPEN, 2017)

Alguns habitantes da Terra são mais irradiados do que outros, uma vez que os níveis de radiação natural aumentam consideravelmente dependendo da região onde o nível de radiação natural é muito mais alto que o normal. A utilização de determinados materiais de construção civil, a isolamento térmica dos ambientes, a altitude, bem como as viagens de avião também podem aumentar de forma considerável a exposição do homem à radiação natural. As fontes terrestres são responsáveis pela maior parte da dose recebida pelo homem decorrente da radiação natural. Em condições normais produzem mais de 5/6 das doses efetivas individuais, sendo a maioria por irradiação interna, como pode ser visto na Figura 5. Os raios cósmicos são responsáveis pelo resto da exposição natural, principalmente pela irradiação externa.

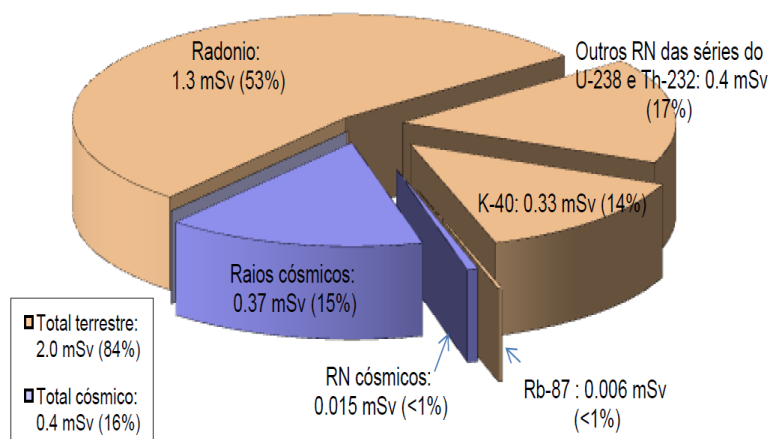


Figura 5. Dose individual média anual decorrente de fontes naturais (IPEN, 2017).

2.7 Radioatividade Artificial

A descoberta de Curie e Joliot, em 1934, onde os produtos de algumas transformações nucleares induzidas são radioativos iniciou uma nova etapa na física nuclear. Em seus estudos, descobriram que o bombardeio de partículas α sobre núcleos de elementos leves pode originar elementos radioativos, daí o nome radioatividade artificiais. Descobriu-se, ainda, que reações nucleares induzidas por prótons, dêuterons, nêutrons e fótons também podem resultar em produtos radioativos. Os radionuclídeos artificiais podem ser caracterizados por sua meia-vida e pela radiação que emitem, analogamente aos radionuclídeos naturais.

Os testes superficiais das bombas nucleares ou o vazamento de reatores nucleares ocasionaram o surgimento de vários elementos radioativos artificiais, encontrados atualmente em todo o globo terrestre devido ao “fallout” (*precipitação radioativa**).

A explosão de armas nucleares de potência menor que um megaton, na superfície terrestre, produz uma nuvem que atinge apenas a troposfera, sendo que os fragmentos maiores caem à terra por efeito gravitacional provocando o “fallout” local poucas horas depois da explosão, numa extensão de alguns quilômetros ao redor do ponto da explosão. Os fragmentos menores que alcançam a troposfera são transportados ao redor do globo terrestre pelos ventos, que tem sentido predominante de oeste para leste, sendo depositados na superfície terrestre pela precipitação atmosférica numa faixa de 20° a

30° a partir da latitude onde ocorre a explosão, num período de 4 a 7 semanas (Glasstong, 1964).

O “fallout” total de ^{137}CS no hemisfério norte é maior que no hemisfério sul, porque uma maior quantidade de testes atmosféricos nucleares foi feita no hemisfério norte. Esses eventos locais como o de Chernobyl tem um impacto significativo na região onde ocorreu o acidente, ou seja, na região do “fallout” local, mas tem impacto limitado nas taxas de “fallout” global.

2.8 Radionuclídeos em Alimentos

As plantas são os receptores primários da contaminação radioativa da cadeia alimentar, seguido dos radionuclídeos da atmosfera. Em uma escala global, a incorporação dos elementos radioativos na biosfera provém da deposição dos elementos da atmosfera para a superfície da Terra, através do “fallout”. Desta forma, o transporte dos elementos radioativos no ambiente envolve a transferência entre três componentes primárias: vegetação, solo e água. A vegetação está sujeita a contaminação direta e indireta. A contaminação direta refere-se à deposição dos materiais radioativos da atmosfera diretamente nas partes superficiais da planta e a contaminação indireta refere-se à sorção dos radionuclídeos do solo a partir do seu sistema de raízes. Os receptores secundários da cadeia alimentar são os animais, que consomem as plantas ou outros animais. Ambas as plantas e produtos animais entram na dieta humana.

Além da possibilidade de contaminação por radionuclídeos artificiais, que ocorre principalmente da deposição de materiais radioativos da atmosfera nas partes superficiais da planta que gera uma contaminação direta, técnicas de cultivo podem enriquecer o solo com radionuclídeos, como o uso indiscriminado de fertilizantes fosfatados, que podem aumentar o nível de radioatividade dos alimentos. Assim, os fertilizantes fosfatados, de acordo com sua origem, podem conter vários elementos, incluindo os radionuclídeos naturais ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K (GARCÊZ, 2016).

O salmão do Pacífico, por exemplo, que forma uma grande parte da dieta de equinos e índios nativos norte americanos é rica em ^{226}Ra , contendo aproximadamente 740 Bq.Kg^{-1} (KATHREN, 1998).

O esquema da Figura 6 descreve o ciclo de incorporação de radionuclídeos no solo até a absorção pelo homem, ou seja, através de que meios o homem ingere material radioativo.

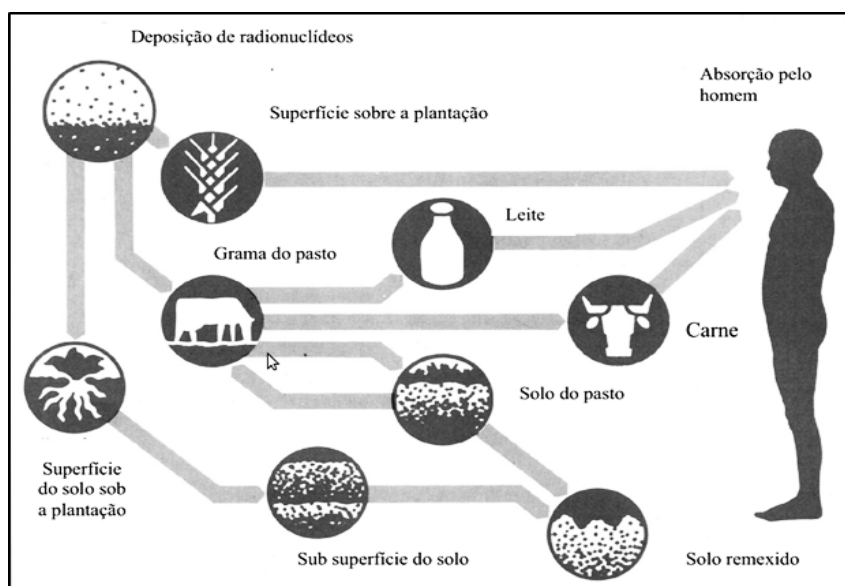


Figura 6. Descreve o ciclo de incorporação de radionuclídeos até a absorção pelo homem (MELQUIADES, 2004)

2.9 Efeito Biológico da Radiação

Uma partícula ionizante ao arrancar um elétron de um dos átomos de uma molécula do corpo, pode causar sua desestabilização e conseqüentemente quebra da molécula. As quatro formas de atuação da radiação no corpo humano são descritas a seguir (OKUNO, 2010).

Primeiro ocorrerá o estágio físico, aonde haverá a ionização do átomo em 10^{-15} s, em seguida começa o estágio físico-químico, quando ocorrem as quebras das ligações químicas das moléculas que sofreram ionização, com duração de uns 10^{-6} s, em seguida ocorre o estágio químico, quando os fragmentos da molécula se ligam a outras moléculas, com duração de poucos segundos e por último ocorre o estágio biológico, que pode durar dias, semanas ou até várias dezenas de anos quando surgem efeitos bioquímicos e fisiológicos com alterações morfológicas e funcionais dos órgãos (OKUNO, 2010).

A ação da radiação na célula pode ocorrer de forma direta, quando a radiação interage diretamente com as moléculas, podendo causar desde mutação genética até morte celular ou mecanismo indireto, quando a radiação quebra a molécula de água, formando radicais livres que podem atacar outras moléculas sendo um mecanismo importante visto que nosso corpo é composto por mais de 70% de água (OKUNO, 2010).

Os efeitos da radiação sobre a matéria podem ser classificados em determinísticos e estocásticos de acordo com a quantidade de dose recebida, se for uma dose alta acima de certo limiar de dose, cujo valor depende do tipo de radiação e do tecido irradiado o efeito será determinístico aonde ocorrerá a morte celular, se for uma dose abaixo de um certo limiar de dose, o efeito pode nem ser sentido, mas se um número grande de células de um órgão morrer, seu funcionamento pode ser prejudicado, pode ser bastante tardio e resultar em danos aos tecidos, doenças vasculares cardíacas e cerebrais além da opacificação do cristalino, e a catarata. Nessas reações, quanto maior a dose, mais grave é o efeito (OKUNO, 2010).

Os Efeitos estocásticos são mutações que surgem nas células e podem causar câncer e o efeito hereditário. As recomendações de proteção radiológica consideram que esse tipo de efeito pode ser induzido por qualquer dose, inclusive dose devido à radiação natural. São sempre tardios e a gravidade do efeito não depende da dose, mas a probabilidade de sua ocorrência aumenta com a dose. Os efeitos hereditários ocorrem nas células sexuais e podem ser repassadas aos descendentes. (OKUNO, 2010).

2.10 Espectrometria Gama

A espectrometria gama de alta resolução tem sido largamente utilizada na determinação de radionuclídeos em amostras ambientais, técnica não destrutiva que permite a identificação e a determinação da atividade dos emissores gama diretamente das amostras, sem a necessidade de separação química dos elementos, gerando máxima eficiência, obtendo-se uma identificação qualitativa e quantitativa dos radionuclídeos presentes na amostra.

A concentração específica de um dado radionuclídeo é calculada seguindo as normas da IAEA (1989), pela equação abaixo:

$$C_{esp} = \frac{N_L}{\varepsilon.m.t.P_\gamma} \quad (10)$$

Onde:

C_{esp} = atividade do radionuclídeo (Bq. kg⁻¹).

N_L = área líquida medida do fotopico de interesse

ε = eficiência de detecção do detector HPGe para a energia de interesse

P_γ = probabilidade de transição absoluta por decaimento gama para a energia de interesse

m = massa da amostra (kg)

t = tempo de medida (s)

Os principais parâmetros a serem considerados para análise por espectrometria gama para garantir um bom desempenho dos detectores e um aumento da confiabilidade dos resultados são: (1) eficiência de contagem por energia do fóton, pois a determinação da eficiência de contagem é o problema chave para medidas por espectrometria gama; (2) boa calibração do sistema de medidas; (3) boa resolução do sistema por fotopico; (4) baixo limite de detecção; (5) um sistema que forneça o cálculo da área líquida do fotopico; (6) um arranjo experimental que permita validar os resultados experimentais com a utilização de padrões certificados; (7) minimização da auto-absorção pelo uso de padrões com densidades semelhantes às amostras analisadas e padronização das massas das amostras analisadas, dos padrões e do tempo de aquisição (JÚNIOR, 2009).

CAP. 3 - METODOLOGIA

3.1 Características do HPGE

Para obter os espectros de emissão gama a tabela 4 mostra os principais componentes do detector de Germânio Hiper Puro (HPGe) vertical da Canberra.

Tabela 4. Características do HPGE

Fabricante	Canberra
Modelo	GC3020
Eficiência Relativa	30%
Resolução (1332 KeV)	1,808 KeV
Diâmetro do Cristal	62 mm
Altura do Cristal	40 mm
Pré-Amplificador (modelo)	2002CSL
Criostato (modelo)	7500SL-RDC-4
Voltagem usada no sistema multicanal foi DSA 1000 (Digital Spectrum Analyzer), com 8192 canais.	4,5 KV
Pacote de software utilizado para análise de gama, inclui um conjunto de algoritmos de análise avançada para o processamento adicional dos espectros de gama adquiridos. Os algoritmos fornecem uma análise completa dos espectros, incluindo área, largura total a meio máximo, eficiência, biblioteca de radionuclídeos ajustável, entre outros.	Genie 2000
Blindagem	Modelo 747, com 10 cm de chumbo de baixo fundo de radiação, parte interna recoberta de 1 mm de estanho, que por sua vez, também é recoberto por 1,6 mm de cobre, e externamente por 9,5 mm de aço com baixa percentagem de carbono. Está blindagem tem uma cavidade com diâmetro interno de 27,9 cm por 40,6 cm de profundidade.

A Figura 7 mostra o sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho.

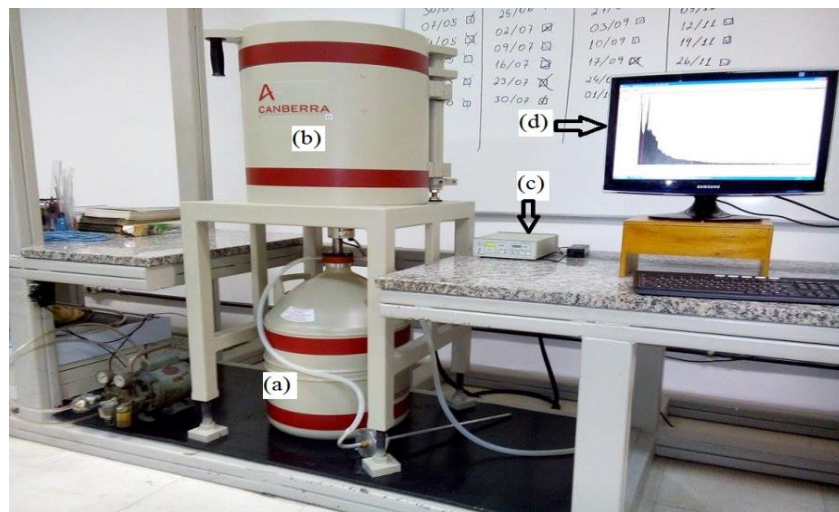


Figura 7. Espectrômetro utilizado: Em (a) observa-se o dewar com capacidade de trinta litros. Em (b) a blindagem do detector com baixo fundo de radiação de 10 cm de chumbo de recoberta de 1 mm de estanho. Em (c) O multicanal DSA 1000. Em (d) o espectro de uma amostra na tela do computador.

3.2. Eficiência de detecção

O LabSOCS (Laboratory Sourceless Object Calibration Software) é um programa computacional que realiza calibrações matemáticas de eficiência, sem necessidade de fontes radioativas. Isso permite uma calibração rápida e precisa de várias geometrias sem necessidade de fontes de referência. Este software inclui um detector caracterizado e algoritmos computacionais para realizar a correção de auto-atenuação de energias de fótons na amostra, paredes de suporte de amostra e o próprio detector (BRONSON, 2003). Também fornece curvas de calibrações matemáticas para eficiência de detecção. As incertezas da calibração vão de 4% para altas energias (>500keV) e chegam a 15% para baixas energias (46.5 – 80 keV) (KAMINSKI. 2014). A caracterização do detector pelo fabricante é a grande vantagem desse código, sendo necessário apenas inserir as características físicas e químicas da amostra e do porta amostra.

A Figura 8 mostra o espectro em energia da radiação gama produzida pelos radionuclídeos contidos na solução líquida e a curva de eficiência calculada no *Geometry Composer* através do LabSOCS.

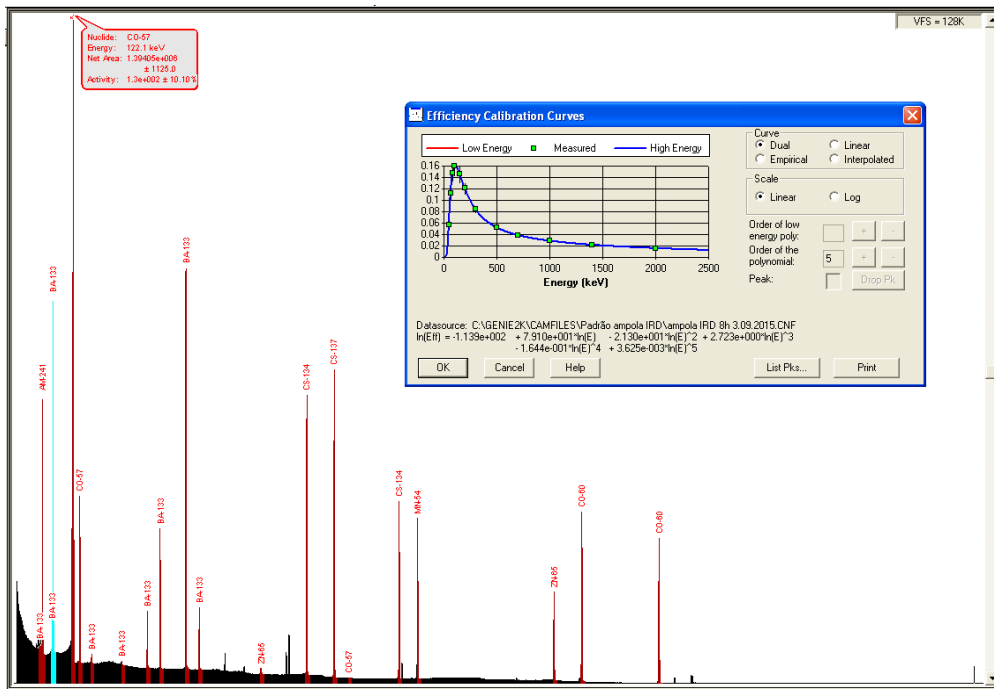


Figura 8. Espectro e curva de eficiência gerados com o uso de fonte padrão produzida pelo LNMRI – IRD/CNEN

A eficiência de detecção para cada energia foi feita utilizando um pacote de *softwares* LabSOCS (*L*aboratory *S*ourceless *C*alibration *S*oftware) da Canberra. Para tal, foi necessário desenhar a geometria utilizada em ambiente computacional inserindo as características físicas, químicas e geométricas do béquer e da amostra analisada. Após a modelagem geométrica, o software divide toda a região fonte (porta-amostra e amostra) em 1024 voxels, e de forma aleatória escolhe um ponto em cada voxel e calcula a eficiência de detecção a partir dos valores encontrados. Depois o *software* dobra o número de voxels e faz todo o processo novamente, e obedecendo a critérios de convergência compara os valores. Caso os valores de eficiência simulados não converjam, o número de voxels é dobrado novamente até obter a convergência satisfatória.. A Figura 9 mostra a visualização gráfica do *Geometry Composer*, integrante do pacote de *softwares* LabSOCS.

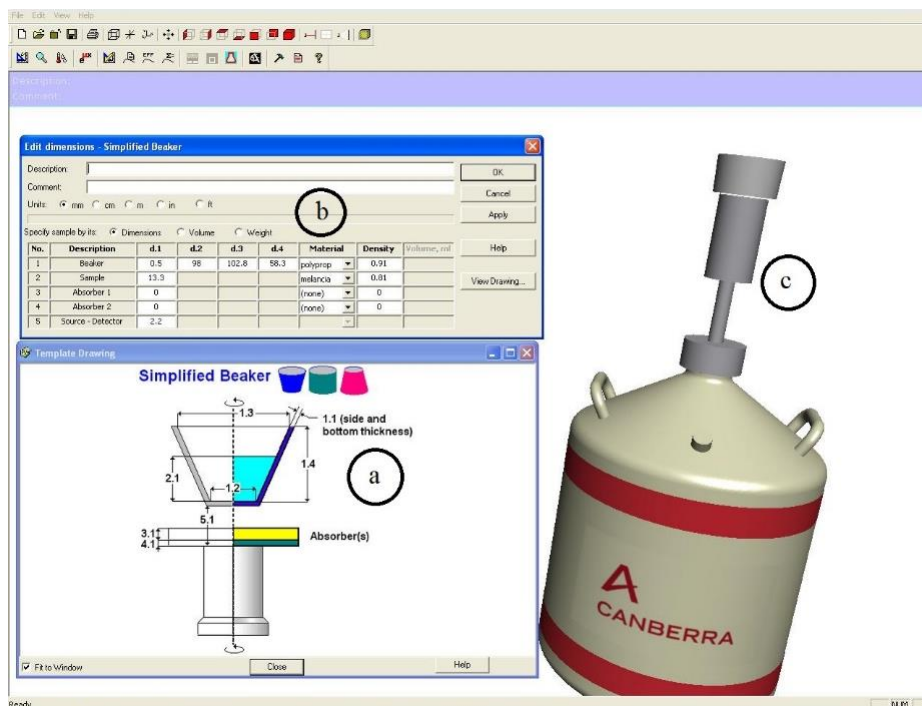


Figura 9: Visualização gráfica do Geometry Composer. Em (a) pode-se observar o gabarito da geometria a ser modelada. Em (b) a matriz da caixa de diálogo onde deve ser inserido as dimensões do becker, como proposto em (a). Em (c) o resultado visual das inserções.

3.3 Preparações das amostras

Os condimentos foram obtidos no comércio varejista da cidade do Rio de Janeiro. As amostras foram coletadas entre maio de 2015 e dezembro de 2015. As amostras foram seladas em potes de polietileno de 200 ml, para aferir as massas das amostras, foi utilizada uma balança digital da marca Gehaka, modelo BG 4000, com sensibilidade de $\pm 0,01$ g e foram então deixadas em repouso durante pelo menos quarenta e cinco dias para atingir o equilíbrio secular. O tempo de contagem utilizado para obter o espectro para o cálculo da atividade foi de 8 horas.

Os parâmetros utilizados no cálculo da concentração específica são dados pela equação abaixo.

$$C_{esp} = \frac{N_L}{\varepsilon.m.t.P_\gamma} \quad (11)$$

Onde C_{esp} é a concentração específica do radionuclídeo por unidade de massa da amostra em $Bq \cdot kg^{-1}$, N_L é a área líquida sob o pico da foto, m é a massa da amostra

em quilogramas, ε está contando eficiência para uma energia específica (γ), P_γ é a probabilidade de emissão medida de raios gama (γ) e t é o tempo de contagem em segundos.

O erro associado a atividade específica deverá ser estimado utilizando a propagação de erros, de acordo com a equação abaixo.

$$\delta C_{esp}^2 = \left(\frac{1}{\varepsilon \cdot P_\gamma \cdot m \cdot t} \right)^2 \cdot \delta N_L^2 + \left(\frac{N_L}{\varepsilon^2 \cdot P_\gamma \cdot m \cdot t} \right)^2 \cdot \delta \varepsilon^2 + \left(\frac{N_L}{\varepsilon \cdot P_\gamma^2 \cdot m \cdot t} \right)^2 \cdot \delta P_\gamma^2 \quad (12)$$

Onde δC_{esp} é a incerteza da atividade específica, δN_L a incerteza da área líquida fornecida pelo *Genie 2k*, $\delta \varepsilon$ a incerteza associada a eficiência de detecção fornecida pelo LabSOCS e δP_γ a incerteza da probabilidade de emissão do fóton de interesse.

A Atividade Mínima de Detecção (MDA) foi calculada para cada amostra com nível de confiança de 95% da equação abaixo. O parâmetro σ é o desvio padrão do pico de interesse no fundo medido no tempo t .

$$MDA(\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{2,71 + 4,66 \cdot \sigma}{P_\gamma \cdot t \cdot m \cdot \varepsilon} \quad (13)$$

Para medir a concentração específica de ^{40}K , utilizou-se a energia de decaimento gama de 1460,8 keV. Para determinar a concentração específica de ^{226}Ra , utilizou-se a linha de emissão gama do ^{214}Bi (1120 keV). Para determinar a concentração específica de ^{228}Ra , utilizou-se a linha de emissão gama do ^{228}Ac (911,1 keV). Para determinar a concentração específica ^{228}Th a linha de emissão (238,6 keV) do ^{212}Pb foi utilizada.

3.4 Calculo de dose Efetiva Comprometida

A dose efetiva anual de radionuclídeos nos alimentos foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$D_{ef} = D_f \times U \times C_d \quad (14)$$

Onde: D_{ef} corresponde a dose efetiva anual ($\mu Sv.ano^{-1}$);

D_f é o coeficiente de dose publicado pela ICRP 2012 ($Sv.Bq^{-1}$);

U é a quantidade de alimento consumido em um ano (kg/ano);

C_d a concentração específica do radionuclídeo no alimento ($Bq.kg^{-1}$);

Na tabela 5 mostra aos principais valores dos coeficientes de dose para o cálculo da dose efetiva comprometida.

Tabela 5.: Determinação coeficiente de dose publicado pela ICRP 2012.

Nuclídeo	$f_1(>1 \text{ ano})$	$D_f / \text{idade} (Sv.Bq^{-1})$				
		1-2 anos	2-7 anos	7-12anos	12-17 anos	>17 anos
^{40}K	1,000	$4,2 \times 10^{-8}$	$2,1 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$	$7,6 \times 10^{-9}$	$6,2 \times 10^{-9}$
^{137}Cs	1,000	$1,2 \times 10^{-8}$	$9,6 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$
^{226}Ra	0,200	$9,6 \times 10^{-7}$	$6,2 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-7}$
^{228}Th	$5,0 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$9,4 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$
^{228}Ra	0,200	$5,7 \times 10^{-6}$	$3,4 \times 10^{-6}$	$3,9 \times 10^{-6}$	$5,3 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-7}$

f_1 - absorcao nacional (fator de transferencia do radionuclídeo do trato gastrintestinal para o sangue).

3.5 Cálculo do Risco de Câncer ao longo da Vida (Rc)

O risco a população é estimado assumindo uma relação dose-efeito linear sem limiar conforme a prática da ICRP. Para doses baixas, fator de risco de câncer fatal é de 0,05 Sv⁻¹ (ICRP1990). O fator de risco indica a probabilidade de uma pessoa morrer de câncer aumentar em 5% para uma dose total de 1 Sv recebida durante a vida. Para estimar o risco de câncer para uma pessoa adulta usando o seguinte relação (ALGHANDI, 2014):

$$R_c = C_d \times RF \text{ (Sv}^{-1}\text{)} \quad (15)$$

onde: RF é fator de risco (Sv⁻¹), risco fatal de câncer por Sivert. Para efeitos estocásticos, a ICRP 60 usa valores de 0,05 para o público (ICRP, 1990). C_d é a dose efetiva da vida útil, que é uma medida da dose efetiva total recebida durante uma vida útil média de 50 anos após a ingestão de um radionuclídeo. C_d foi calculado usando (UNSCEAR, 2000):

$$C_d = 50 \times D \quad (16)$$

Onde D é a dose efetiva total para um indivíduo.

CAP. 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Curvas de ajustes

A calibração em energia foi realizada com o auxílio do *software Gamma Analysis* do Genie 2000, que relaciona a informação obtida pelo analisador multicanal (DSA 1000) com unidades de energia (eV, keV, etc), através de um ajuste linear para o caso de duas linhas de energia, ou através de um ajuste quadrático caso três ou mais linhas de energia sejam utilizadas. A curva de ajuste em energia foi feita utilizando fontes radioativas certificadas junto ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD / CNEN). O ajuste quadrático foi feito utilizando 14 pontos experimentais de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6. Pontos experimentais utilizado para ajuste quadrático em energia

Energia (keV)	Canal	Energia (keV)	Canal
59,5	245	383,9	1574
81	333	511	2094
86,5	356	661,7	2712
105,3	433	1173,2	4812
276,4	1133	1274,5	5225
302,8	1242	1332,5	5465
356	1460	1460,8	5989

A Figura 10 mostra o comportamento dos pontos experimentais utilizados no ajuste em energia. A Equação 17 representa a relação entre canal e energia para todo o espectro utilizado nesse trabalho.

$$y = 0,24x - 0,13 \quad (17)$$

A energia corresponde ao eixo das ordenadas enquanto o canal corresponde ao eixo das abscissas. O coeficiente de determinação do ajuste é de $R^2=0,99$.

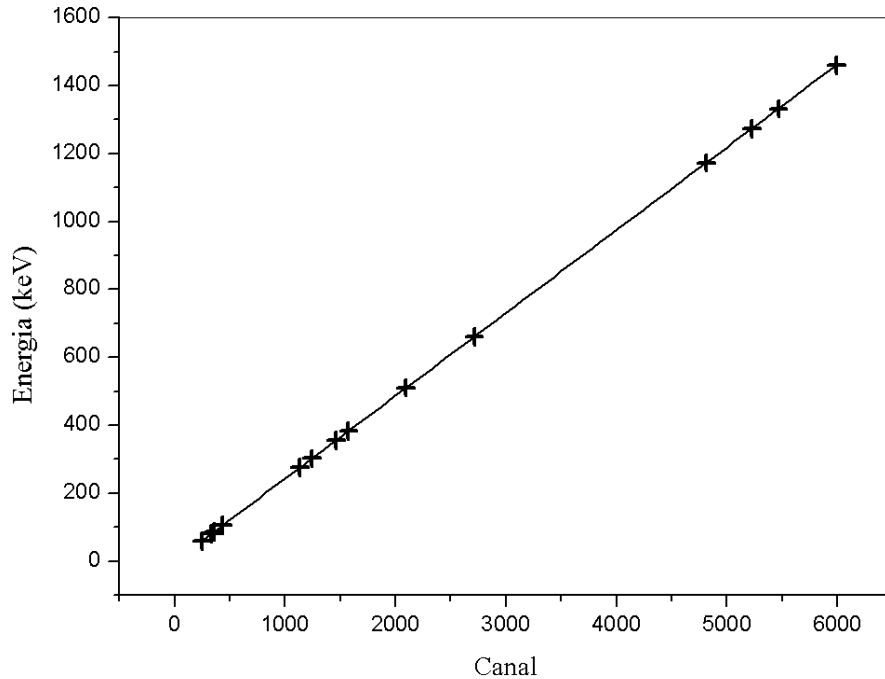


Figura 10. Ajuste em energia para espectrometria gama.

4.2 Condimentos

A Tabela 7 mostra a concentração específica dos radionuclídeo dadas em Bq.kg^{-1} em 22 amostras de condimentos analisadas por espectroscopia gama e os erros de medição apresentados representam a propagação de erros devido a incertezas na área sob o pico, eficiência de detecção e probabilidade de decaimento. Foi utilizado os coeficientes de doses para adulto > 17 anos, foi utilizado como condição de contorno o consumo de 1 kg por ano. Dezoito amostras apresentaram valores acima do MDA para ^{228}Th e dezesseis para o ^{228}Ra e Todas as amostras apresentaram valores de atividade específica acima da atividade mínima detectável (MDA) para ^{40}K .

Tabela 7. Concentração de Atividade Específica nos Condimentos em (Bq/kg)

Condimentos(Amostras)	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th
Coloral	21.0 ± 7.1	-	<3.2	21.0 ± 7.1
Caldo da galinha em pó	21.8 ± 5.8	-	-	-
Pimenta malagueta	55.2 ± 7.4	-	<3.1	-

Canela	129 ± 16	-	<6.2	2.9 ± 1.6
Coentro em pó	156 ± 13	-	5.5 ± 1.0	<2.0
Louro em pó	218 ± 18	-	-	<2.8
Alho desidratado	346 ± 19	-	<3.6	-
Ginseng	366 ± 22	-	<5.2	<6.5
Tempero sírio (<i>Ba-Har</i>)	377 ± 22	-	5.6 ± 1.4	7.7 ± 1.5
Gengibre em pó	379 ± 21	-	-	<2.0
Alecrim	380 ± 28	<16.2	9.4 ± 2.3	<4.0
Curry	442 ± 22	-	<0.41	<1.9
Páprica picante	453 ± 23	-	<4.5	-
Chilli	508 ± 27	-	-	<2.6
Orégano	520 ± 48	-	<15.9	<7.2
Cominho	532 ± 27	-	7.5 ± 1.6	5.8 ± 0.9
<i>Chimichurri</i>	627 ± 35	-	<8.6	5.3 ± 2.3
Pimenta do reino	702 ± 33	-	22.7 ± 2.2	33.9 ± 3.2
Açafrão	890 ± 30	-	-	2.1 ± 1.2
Manjeriçã	983 ± 56	-	<11.7	<5.3
Salsinha	1177 ± 69	-	13.2 ± 4.2	6.3 ± 3.8
<i>Cheiro verde</i>	1288 ± 65	-	-	5.7 ± 3.0

Todas as amostras apresentaram valores acima do MDA para o ^{40}K e a amostra que mostrou a maior concentração foi o cheiro verde com concentração de (1288 ± 65) Bq/kg, enquanto a amostra que teve o menor valor foi o coloral com concentração de (21.0 ± 7.1) Bq/kg. Entretanto, vale observar que nenhuma amostra apresentou valor mensurável de ^{226}Ra , porém, seis amostras apresentaram valor mensurável para o

^{228}Ra cuja concentração mais alta foi na pimenta do reino (22.7 ± 2.2) Bq/kg e 9 amostras apresentaram valor mensurável para o ^{228}Th cuja amostra que apresentou a maior concentração foi novamente a pimenta do reino (33.9 ± 3.2) Bq/kg. Entretanto, o tempero sírio (bahar) foi a única amostra que apresentou uma concentração específica de ($6,1 \pm 1,1$) Bq/kg para o ^{137}Cs .

Quando AMIN E AHMED (2013) analisaram amostras de pimenta do reino para o ^{40}K encontraram em valor de concentração de (130 ± 4) Bq/kg, enquanto, AL-GHAMDI (2014) quantificou para a pimenta do reino uma concentração de (446.13 ± 3.4) Bq/kg, ou seja, todos mostraram valores abaixo do determinado no presente estudo, essa diferença pode ser devido a diversos fatores, uma delas é ligada ao solo e ao equipamento utilizado. Entretanto, esses autores encontraram valor para o ^{226}Ra na pimenta do reino cujos valores foram de (10.4 ± 0.3) Bq/kg para AMIN E AHMED (2013) e (21.37 ± 0.92) Bq/kg para AL-GHAMDI (2014), radionuclídeo que não foi identificado neste trabalho. Por outro lado, eles não encontraram valores para o ^{228}Th , ao contrário do presente trabalho, cujo valor encontrado foi (33.9 ± 3.2) Bq/kg.

Foi encontrado para a pimenta do reino valores de ^{228}Ra para os três trabalhos cujos valores são de 22.7 ± 2.2 para o presente trabalho, de 6.5 ± 0.2 para os autores Amin e Ahmed (2013) e de 3.31 ± 0.20 para o autor Al-Ghamdi (2014), nota-se a grande diferença de valores medidos nesse trabalho e no trabalho dos autores aqui citado, essa diferença pode ter sido provocado pela diferença da preparação da amostra bem como a calibração e a metodologia explicada.

Pode se fazer uma análise de comparação com o coentro visto que no presente trabalho obteve-se uma concentração de (156 ± 13) Bq/kg para o ^{40}K , os autores AMIN E AHMED (2013) encontraram (911 ± 28) Bq/kg, uma diferença considerável devido a concentração obtida no presente trabalho. Enquanto AL-GHAMDI (2014) encontrou (589.63 ± 5.1) Bq/kg, concentração acima da encontrada nesse presente trabalho.

4.3 Dose Efetiva Total e Risco de Câncer

Os valores de referência da UNSCEAR (2000) para dose efetiva anual devido à ingestão dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th são apresentados na Tabela 8. Note que não há valores de referência para ^{40}K , pois este, independentemente do consumo pessoal, está em equilíbrio homeostático com o organismo, tendo o valor de dose efetiva total sugerido em $165\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ (UNSCEAR, 2000).

Tabela 8. Valores de referência para dose efetiva comprometida (UNSCEAR, 2000)

Radionuclídeo	Dose efetiva ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$)
^{226}Ra	6,3
^{228}Ra	11
^{228}Th	0,22

Com base nos fatores específicos de conversão de atividade para a dose efetiva anual devido à ingestão de usuários do público (adultos) tabelados na Publicação ICRP 119 (2012), a dose efetiva global anual devido a fontes de radiação natural é de 2,4 mSv, desse valor 0,29 mSv é devido à ingestão. As doses efetivas dos condimentos e nos Risco de câncer foram calculadas considerando uma taxa de consumo de 1kg/ano e os resultados são mostrados em Tabela 9.

Tabela 9. Dose efetiva para ingestão para membros do público em $\mu\text{Sv}/\text{ano}$ e Risco de Câncer por ano

Condimentos (Amostras)	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th	Total de dose efetiva	Risco de Câncer $\times 10^{-4}$
Coloral	0.13	-	-	1.51	1,64	$4,11 \times 10^{-2}$
Caldo da galinha em pó	0.14	-	-	-	0.14	$3,38 \times 10^{-3}$
Pimento malagueta	0.34	-	-	-	0,34	$8,56 \times 10^{-3}$

Canela	0.80	-	-	0.21	1,01	$2,52 \times 10^{-2}$
Coentro em pó	0.97	-	3.80	-	4,76	1,19E-05
Louro em pó	1.35	-	-	-	1,35	$3,38 \times 10^{-2}$
Alho desidratado	2.15	-	-	-	2,15	$5,36 \times 10^{-2}$
Ginseng	2.27	-	-	-	2,27	$5,67 \times 10^{-2}$
Tempero sírio (<i>Ba-Har</i>)	2.34	-	3.86	0.55	6,75	$1,69 \times 10^{-1}$
Gengibre em pó	2.35	-	-	-	2,35	$5,87 \times 10^{-2}$
Alecrim	2.36	-	6.49	-	8,85	2,21E-05
Curry	2.74	-	-	-	2,74	$6,85 \times 10^{-2}$
Páprica picante	2.81	-	-	-	2,81	$7,02 \times 10^{-2}$
Chilli	3.15	-	-	-	3,15	$7,87 \times 10^{-2}$
Orégano	3.22	-	-	-	3,22	$8,06 \times 10^{-2}$
Cominho	3.30	-	5.18	0.42	8,90	$2,22 \times 10^{-1}$
<i>Chimichurri</i>	3.89	-	-	0.38	4,27	$1,07 \times 10^{-1}$
Pimenta do reino	4.35	-	15.70	2.44	22,46	$5,61 \times 10^{-1}$
Açafrão	5.52	-	-	0.15	5,67	$1,42 \times 10^{-1}$
Manjeriço	6.09	-	-	-	6,09	$1,52 \times 10^{-1}$
Salsinha	7.30	-	9.11	0.45	16,86	$4,21 \times 10^{-1}$
<i>Cheiro verde</i>	7.99	-	-	0.41	8,40	$2,10 \times 10^{-1}$
Total	65.54	-	44,14	6,53	116,21	2,90
Média	2,98	-	2,00	0,30	5,28	$1,32 \times 10^{-1}$
UNSCAR, 2000	-	6,3	11	0,22	17,52	$4,38 \times 10^{-1}$

A maior contribuição percentual para a dose efetiva comprometida encontrada no presente estudo foi devida ao ^{40}K cerca de 56 %, o ^{228}Ra contribui com cerca de 38% e o ^{228}Th cerca de 6%, porém, o ^{226}Ra não apresentou estimativa de dose pelo fato da concentração específica ficar abaixo do MDA .

O condimento mais radioativo analisado neste estudo foi à pimenta do reino, cuja ingestão de 13 kg é suficiente para atingir a dose anual efetiva devido à ingestão. Porém, segundo o site do SEBRAE MARKTING (2015) a quantidade de consumo anual desse alimento no ano de 2015 foi de 0,5 gramas por dia, enquanto no México foi de 8 gramas por dia. Pode-se estimar que no ano no Brasil é consumido 0,2825 kg por ano, portanto ficamos muito longe dos 13 kg necessários para atingir o limite. No México, a quantidade anual de consumo é de 2,92 kg. Em comparação com o trabalho dos autores AMIN E AHMED (2013) cuja dose total calculada foi de 5,21 $\mu\text{Sv}/\text{ano}$ e o autor AL-GHAMDI (2014) que encontrou um valor de 9,51 $\mu\text{Sv}/\text{ano}$, observa-se uma diferença expressiva nos valores. Se tratando do risco de câncer esse presente trabalho calculou para essa amostra um valor de $5,61 \times 10^{-5}$, ou seja, a probabilidade de aumento do risco de câncer a dieta diária é de apenas 0,00561%, enquanto, AL-GHAMDI (2014) encontrou um valor de $2,4 \times 10^{-5}$.

A dose efetiva devido aos testes nucleares e ao acidente de Chernobyl é de (7 μSv / ano) e a dose efetiva devido ao ^{137}Cs encontrado no tempero sírio é de (0,08 μSv /ano). Considerando que no ano uma pessoa consuma 12 kg a dose estimada é de 0,96 μSv , o que nos daria um valor dentro do limite de dose estabelecido do céσιο. A dose de ingestão do radionuclídeo artificial ^{137}Cs é inferior a 0,7% da dose de ingestão dos radionuclídeos naturais ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th .

A amostra de Cheiro verde (mistura de salsinha e cebolinha) e amostra de salsinha apresentaram as mais altas doses efetivas para o ^{40}K , mas não apresentaram a dose efetiva total mais alta. Porém, a salsinha apresentou uma quantidade alta de ^{228}Ra , entretanto, segundo site da Embrapa (2018) para a região sudeste o consumo anual fica em torno de 0,049 kg, logo podemos perceber que o limite não será acedido para esse alimento, pois a dose efetiva seria de 0,45 $\mu\text{Sv}/\text{ano}$, o que nos daria em percentual de 0,4% da dose total levando em conta todos os condimentos analisados.

A dose total dos seguintes condimentos: cheiro verde, salsinha, pimento do reino, cominho e alecrim, deram cerca de 56 % da dose total das 22 amostras de condimentos,

isso mostra que uma quantidade pequena de condimentos é responsável pelas maiores doses. A Média total de dose e o Risco de Câncer ficaram abaixo da estabelecida pela UNSCEAR.

Este trabalho trouxe como algo novo o cálculo do risco de câncer em condimentos , algo que até então só havia sido apresentado em outros países.

CAP. 5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feito um estudo das concentrações específicas do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th e ^{137}Cs em amostras de condimentos utilizando espectrometria gama de alta resolução. Foram analisadas 22 amostras de condimentos e foi estimado a dose efetiva devido a ingestão dos condimentos e o risco de câncer.

A validação do sistema de espectrometria gama (HPGe) foi feito a partir da comparação dos dados experimentais de eficiência e dos valores simulados de eficiência pelo software LabSOCS.

A concentração de atividade de ^{40}K foi medida em todas as amostras e os valores atividades específicas variaram de 21.0 ± 7.1 Bq/kg (coloral) para 1288 ± 65 Bq/kg (cheiro verde), já para o ^{228}Ra os valores de concentração específica variaram de 5.5 ± 1.0 (coentro em pó) para 22.7 ± 2.2 Bq/kg (pimenta do reino) e para o ^{228}Th elas variaram de 2.1 ± 1.2 Bq/kg (açafreão) até 33.9 ± 3.2 Bq/kg (pimenta do reino).

O radionuclídeo que mais contribui para a efetiva dose efetiva é o ^{40}K , com mais de 56% do total. Mas o potássio é uniformemente distribuído no corpo, e sua concentração está sob controle homeostático, e não representa um risco para a saúde humana (GARCÊZ, 2016). Diferente dos isótopos de rádio estudados aqui, que tem uma longa meia-vida, e seu comportamento é semelhante ao elemento de cálcio, sendo alocado na estrutura óssea. A dose efetiva comprometida total dos condimentos aqui analisados comparado aos outros autores aqui citados AMIN E AHMED (2013) e AL-GHAMDI (2014) revelaram valores bem diferentes isso é importante pois dependendo da concentração de radionuclídeo incorporado pelo condimento pode mostrar alguma anomalia radiométrica na região ao qual ele foi colhido.

O único radionuclídeo artificial com valores de concentração específica mensurável neste trabalho foi o ^{137}Cs encontrado no tempero sírio com atividade específica total de $(6,1 \pm 1,1)$ Bq/kg. A dose total de ingestão para esse radionuclídeo está abaixo de 1% da dose de ingestão dos radionuclídeos naturais (^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th).

O risco de câncer médio calculado nesse trabalho foi de $1,32 \times 10^{-5}$ por ano logo, ou seja, a probabilidade de aumento do risco de câncer a dieta diária é de apenas 0,00132%. Conclui-se que o risco de câncer estimado não apresenta riscos significativos

para a saúde e as amostras de condimentos analisadas são radiologicamente seguras, conforme padrões internacionais. Este trabalho contribui para estabelecer informações de linha de base, pois disponibiliza dados sobre a concentração específica, doses efetivas e risco de câncer de uma variedade de condimentos. Esta base de dados permitirá investigações mais aprofundadas em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIN¹, RAFAT. M. and AHMED²; FAWZIA ; Estimation of annual effective dose to the adult Egyptian population due to natural radioactive elements in ingestion of spices, 2013.
- AI-GHANDI, A.H; Activity Concentrations and Mean Annual Effective Dose of Spices Food Consumed by Inhabitants of Saudi Arabia, 2014.
- BRONSON, F L, “Validation of the accuracy of the LabSOCS software for mathematical efficiency calibration of Ge detectors for typical laboratory samples”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2003.
- CNEN; Diretrizes básicas de radioproteção. Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN-NE-3.01, 1988.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Norma CNEN-NN-3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Resolução CNEN 164/2014. Publicação no DOU em 11/03/2014. (CNEN, 2014a)
- CANBERRA, Genie™ 2000 3.3: Operations Manual, EUA, 2012.
- GLASSTONG, S. The Effects of Nuclear Weapons. Oak Ridge, USAEC, 1964.
- HEILBRON FILHO, P. F. L; XAVIER, A. M; PONTEDEIRO, E. M; FERREIRA, R. S; *Segurança nuclear e proteção do meio ambiente*. E-papers Serviços Editoriais Ltda, 2004.
- IBGE; *Cidades Rio de Janeiro*. População do Estado do Rio. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama> Acessado em 07/02/2018
- IAEA – International Atomic Energy Agency. Measurements of radionuclides in food and the environment. *Technical Report Series 295*, Vienna, 1989.
- ICRP, 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological

Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).

ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).

ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).

ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).

IPEN. *Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental.* Pós-Graduação Acadêmica Programa de Tecnologia Nuclear, 2017.

JÚNIOR, J.A.S.. AMARAL, R. S.. SILVA, C. M.. MENEZES, R. S. C.. BEZERRA, J.D.. Estudo comparativo entre detectores HPGe e NaI(Tl) na determinação de U-238, TH-232 e K-40 em amostras de solo. Universidade Federal de Pernambuco. Scientia Plena. Vol.5, Num.4, 2009.

KAMINSKI, S; JAKOBI, A; WILHELM, C. H. R; Uncertainty of gamma-ray spectrometry measurement of environmental samples due to uncertainties in matrix composition, density and sample geometry. Appl Radiat Isotopes, 306-313, 2014.

KATHREN, R. L. NORM sources and their origins. Applied Radiation and Isotopes. Vol. 49 (3), pag. 149-168, 1998.

MALANCA, A., SOGNI, R.e LEAL, J. S. R. Radioactivity in Brazilian manioc-root flour. *Radiaion. Protection. Dosimetry*, v. 92 (4), p. 329, 2000.

MELQUIADES, F. L; APPOLONI, C. R; *Radioatividade natural em amostras alimentares.* Cad. Brás. Ens. Fís. 2004.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. Física das radiações. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

[ORTEC (1984)] EG&G ORTEC. Experiments in Nuclear Science AN34, Laboratory Manual. Tennessee: EG&G ORTEC, 1984.

PEREIRA, WAGNER de SOUZA ; KELECOM, A. ; PY JUNIRO, DELCY de AZEVEDO ; MENDES, L.M.D. Estimativa de Taxa de dose absorvida no peixe tilapia (*Tilapia nilotica*, Linnaeus, 1758) devido à incorporação de radionuclídeos naturais próximo a uma anomalia uranífera em Santa Quitéria, Ceará, Brasil Linnaeus, 1758) estimado próximo a uma anomalia uranífera em Santa Quitéria, Ceará, Brasil.. *Mundo & Vida* (UFF), v. 11, p. 31-35, 2010.

SEBRAE MARKETING; Temperos, especiarias, molhos e condimentos. Disponível em <http://www.sebraemercados.com.br/temperos-especiarias-molhos-e-os-condimentos-estao-fortalecendo-oportunidades-para-pequenos-negocios/>. Acessado em 07/02/2018.

GARCÊZ, R. W. D., 2016, Determinação das atividades específicas do Ra 226, Ra 228 e K 40 em amostras de fertilizantes minerais. Dissertação de M. Sc. PEN/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SCHEIBEL, V; APPOLONI, C. R; *Radioactive trace measurements of some exported foods from the south of Brazil.* J Food Comp Anal, 2007.

TAUHATA, L., SALATI, I., PRINZIO, R.D., PRINZIO, A. R.D; *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.* Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD/CENEN, 10ª revisão, 2014.

[**UNSCEAR (1993)**] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and Effects of Ionizing Radiation UNSCEAR Report, 1993.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects Atomic Radiation. *Sources and effects of ionizing radiation.* Vienna, 2000.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física IV: Ótica e Física Moderna. 12 ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009.