

DETERMINAÇÃO DAS ATIVIDADES ESPECÍFICAS DE  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$   
EM PLANTAS MEDICINAIS E ORNAMENTAIS UTILIZANDO  
ESPECTROMETRIA GAMA

Wander Nascimento de Araujo Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro

Abril de 2025

DETERMINAÇÃO DAS ATIVIDADES ESPECÍFICAS DE  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$   
EM PLANTAS MEDICINAIS E ORNAMENTAIS UTILIZANDO  
ESPECTROMETRIA GAMA

Wander Nascimento de Araujo Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Aprovada por: Prof. Ademir Xavier da Silva

Dr. José Marques Lopes

Dr. Edmilson Monteiro

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2025

Junior, Wander Nascimento de Araujo

Determinação das Atividades Específicas de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , em Plantas Medicinais e Ornamentais Utilizando Espectrometria Gama / Wander Nascimento de Araujo Junior.  
– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2025.

XIII, 131 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 124-131.

1. Plantas Medicinais e Ornamentais. 2. Detector HPGe. 3. LabSOCS. 4. Atividade Específica. 5. Taxa de Dose. I. Silva, Ademir Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus, porque acredito que tudo o que acontece é porque já está traçado em nossos caminhos, e, essa caminhada foi repleta de aprendizados significativos.

A todos os meus familiares, por estarem sempre ao meu lado dando suporte para que pudesse completar mais esse ciclo. Em especial ao meus pais Wander Nascimento, Edilamar Teixeira e ao meu irmão Philippe Van Der, pelo incentivo irrestrito, me dando todo apoio nos momentos mais difíceis.

A minha esposa Sandra Mara, pelo incentivo e conselhos, além de acompanhar parte dessa minha jornada.

A todos os amigos do LAASC, em especial ao Leandro da Silva, Carlos Pastrana e Jonathan Oliveira, por compartilharem seus conhecimentos fazendo com que pudesse obter grande aprendizado.

Ao corpo docente do Programa de Engenharia Nuclear (PEN) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por proporcionar um ensino de excelência.

Ao Professor Jardel Lemos (UFF), por suas sugestões e esclarecimentos.

Ao Professor Dr: Ademir Xavier da Silva, por ter aceitado ser meu orientador, um ser humano de grande valor, um exemplo de integridade, competência, profissionalismo e dedicação ao trabalho.

Aos membros da banca Professor Dr: José Marques Lopes e Professor Dr: Edmilson Monteiro que disponibilizaram seu valioso tempo para avaliarem este trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DETERMINAÇÃO DAS ATIVIDADES ESPECÍFICAS DE  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$   
EM PLANTAS MEDICINAIS E ORNAMENTAIS UTILIZANDO  
ESPECTROMETRIA GAMA

Wander Nascimento de Araujo Junior

Abril/2025

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Programa: Engenharia Nuclear

Este estudo apresenta uma investigação sobre as concentrações de atividades oriundas dos radionuclídeos naturais  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$  em 55 estruturas botânicas de plantas medicinais e ornamentais. As amostras foram acondicionadas em recipientes padronizados e submetidas a espectrometria gama utilizando um detector semicondutor de germânio hiper-puro (HPGe) associado ao software LabSOCS para determinação das curvas de eficiência. O tempo de contagem utilizado para a aquisição dos espectros foi de 28800 segundos. Os resultados obtidos para concentração de atividade variam de  $(29,41 \pm 9,85$  a  $921,72 \pm 45,87)$   $\text{Bq.kg}^{-1}$  para  $^{40}\text{K}$ , de  $(1,02 \pm 0,60$  a  $6,08 \pm 1,02)$   $\text{Bq.kg}^{-1}$  para  $^{226}\text{Ra}$ , de  $(1,60 \pm 0,37$  a  $25,83 \pm 0,80)$   $\text{Bq.kg}^{-1}$  para  $^{228}\text{Ra}$  e de  $(1,02 \pm 0,98$  a  $10,65 \pm 1,66)$   $\text{Bq.kg}^{-1}$  para  $^{228}\text{Th}$ . Para o grupo de plantas medicinais (26 espécies, 35 estruturas botânicas), foi calculada a taxa de dose efetiva anual, cujos valores individuais variaram de  $(0,56$  a  $8,60)$   $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ , perfazendo um total acumulado de  $79,54$   $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ , valor abaixo do limite de  $1\text{mSv.ano}^{-1}$  recomendado pela ICRP. A estimativa do risco de câncer ao longo da vida, baseada nos coeficientes de conversão da ICRP 119, devido ao consumo de radionuclídeos naturais, indicou um valor médio de 304 casos por milhão de consumidores. Considerando todas as 55 amostras, foram avaliadas a dose absorvida e os valores variaram de  $(2,74$  a  $49,05)$   $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ , e a dose efetiva externa anual, cujo os valores variam de  $(3,35$  a  $60,15)$   $\mu\text{Sv.y}^{-1}$ . Assim, os níveis detectados nas amostras são baixos, evidenciando que o uso dessas espécies não representa risco à saúde humana e estão dentro dos limites estabelecidos pelos padrões internacionais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DETERMINATION OF SPECIFIC ACTIVITIES OF  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  IN  
MEDICINAL AND ORNAMENTAL PLANTS USING GAMMA SPECTROMETRY

Wander Nascimento de Araujo Junior

April/2025

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Department: Nuclear Engineering

This study investigates the activity concentrations of naturally occurring radionuclides  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Th}$  in 55 botanical structures from medicinal and ornamental plant species. The samples were sealed in standardized containers and analyzed via high-resolution gamma-ray spectrometry using a high-purity germanium (HPGe) detector. Efficiency calibration was performed with the LabSOCS software. Each spectrum was acquired over a counting time of 28.800 seconds. The activity concentrations ranged from  $(29.41 \pm 9.85$  to  $921.72 \pm 45.87)$  Bq.kg $^{-1}$  for  $^{40}\text{K}$ , from  $(1.02 \pm 0.60$  to  $6.08 \pm 1.02)$  Bq.kg $^{-1}$  for  $^{226}\text{Ra}$ , from  $(1.60 \pm 0.37$  to  $25.83 \pm 0.80)$  Bq.kg $^{-1}$  for  $^{228}\text{Ra}$  and from  $(1.02 \pm 0.98$  to  $10.65 \pm 1.66)$  Bq.kg $^{-1}$  for  $^{228}\text{Th}$ . For the medical plant group (26 species, 35 botanical structures), the annual committed effective dose was estimated, with individual values ranging from  $(0.56$  to  $8.60)$   $\mu\text{Sv}.\text{year}^{-1}$ , and a cumulative dose of  $79.54$   $\mu\text{Sv}.\text{year}^{-1}$ , which is below the  $1\text{mSv}.\text{year}^{-1}$  limit recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). The estimated lifetime cancer risk due to ingestion of natural radionuclides, based on the ICRP 119 dose conversion coefficients, was approximately 304 cases per million individuals. Across all 55 samples, the absorbed dose rate ranged from  $(2.74$  to  $49.05)$   $\eta\text{Gy}.\text{h}^{-1}$ , while the annual external effective dose ranged from  $(3,35$  to  $60,15)$   $\mu\text{Sv}.\text{year}^{-1}$ .

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 - Introdução.....                                   | 1  |
| 1.1. Considerações Gerais.....                                 | 1  |
| 1.2. Justificativa .....                                       | 3  |
| 1.3. Objetivo .....  | 5  |
| CAPÍTULO 2 - Fundamentação Teórica .....                       | 6  |
| 2.1. Estrutura da Matéria .....                                | 6  |
| 2.1.1. Os Elementos e os Átomos .....                          | 6  |
| 2.1.2. Modelo Nuclear .....                                    | 10 |
| 2.2. Propriedades Gerais dos Núcleos .....                     | 13 |
| 2.3. Reações Nucleares.....                                    | 14 |
| 2.4. Estabilidade Nuclear.....                                 | 16 |
| 2.5. Instabilidade Nuclear e Radioatividade .....              | 17 |
| 2.6. Radioatividade Natural.....                               | 19 |
| 2.7. Radioatividade Artificial.....                            | 22 |
| 2.8. Radionuclídeos e Séries Radioativas .....                 | 22 |
| 2.8.1. Séries Radioativas $^{238}\text{U}$ .....               | 23 |
| 2.8.2. Séries Radioativas $^{232}\text{Th}$ .....              | 24 |
| 2.8.3. Elemento $^{40}\text{K}$ .....                          | 25 |
| 2.8.4. Elemento $^{226}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Ra}$ .....    | 26 |
| 2.9. Plantas Medicinais e Ornamentais.....                     | 27 |
| 2.10. Radionuclídeos em Plantas Medicinais e Ornamentais ..... | 31 |
| 2.11. Efeitos Biológicos da Radiação no Corpo Humano .....     | 34 |
| 2.12. Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria..... | 37 |
| 2.12.1. Efeito Fotoelétrico .....                              | 38 |
| 2.12.2. Efeito Compton .....                                   | 40 |
| 2.12.3. Produção de Pares.....                                 | 42 |
| 2.13. Radiação Ionizante .....                                 | 43 |
| 2.14. Decaimento Nuclear .....                                 | 44 |
| 2.14.1. Radiação Alfa ( $\alpha$ ) .....                       | 45 |
| 2.14.2. Radiação Beta ( $\beta$ ) .....                        | 46 |
| 2.14.3. Radiação Gama ( $\gamma$ ) .....                       | 47 |
| 2.15. Lei do Decaimento Radioativo.....                        | 48 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.16. Atividade Específica.....   | 51  |
| 2.17. Equilíbrio Radioativo Secular .....   | 52  |
| 2.18. Dose Absorvida (D).....   | 53  |
| 2.19. Dose Efetiva (Def).....   | 54  |
| 2.20. Dose Efetiva por Ingestão .....   | 55  |
| 2.21. Espectrometria Gama .....   | 56  |
| 2.22. Sistema Operacional para Aquisição de Espectrometria de Raios Gama .....  | 56  |
| 2.23. Características do Detector Semicondutor HPGE.....  | 57  |
| 2.24. Blindagem.....  | 59  |
| 2.25. Criostato e Dewar .....   | 60  |
| CAPÍTULO 3 – Instrumentação e Metodologia .....   | 62  |
| 3.1. Análises das Amostras .....  | 62  |
| 3.2. Calibração em Energia do Sistema de Aquisição .....  | 72  |
| 3.3. Eficiência de Detecção .....   | 72  |
| 3.4. Validação do Sistema de Detecção .....   | 74  |
| 3.5. Curvas de Ajustes .....  | 75  |
| 3.6. Cálculo da Atividade Específica .....  | 76  |
| 3.7. Incertezas da Atividade Específica .....   | 78  |
| 3.8. Atividade Mínima Detectável (AMD).....   | 79  |
| 3.9. Cálculo de Dose Efetiva Comprometida .....   | 79  |
| 3.10. Cálculo do Risco de Câncer ao Longo da Vida (Rc).....   | 81  |
| CAPÍTULO 4 – Resultados e Discussões .....  | 82  |
| 4.1. Análises das Concentrações de Atividades dos Radionuclídeos .....  | 82  |
| 4.1.1. Concentração de atividades de $^{40}\text{K}$ nas amostras de plantas medicinais e ornamentais 87  |     |
| 4.1.2. Concentração de atividades dos radionuclídeos $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Th}$ nas amostras de plantas medicinais e ornamentais.....                    | 93  |
| 4.1.3. Análise das Concentrações de atividades dos radionuclídeos divididos em grupos de plantas medicinais e ornamentais.....  | 95  |
| 4.2. Cálculos de Dose Efetiva .....   | 103 |
| 4.2.1. Análise Quantitativa das Doses Efetivas .....  | 108 |
| 4.2.2. Análise Quantitativa das Doses Efetivas Acumuladas em Alguns Órgãos do Tecido Humano .....   | 109 |
| 4.3. Cálculo da Estimativa do Risco de Câncer Devido a Ingestão de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Th}$ das Amostras de Plantas Medicinais ..... | 112 |
| 4.4. Cálculos de Dose Absorvida e Dose Efetiva Externa.....   | 115 |



|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| CAPÍTULO 5 –Conclusão .....       | 122 |
| Referências Bibliográficas: ..... | 124 |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Ilustração representativa das estruturas que constituem a matéria .....  | 8  |
| Figura 2: Representa os núcleons e as partículas subatômicas que as constituem os quarks.<br>Fonte:< <a href="https://www.valdiraguilera.net/images/proton-neutron.jpg">https://www.valdiraguilera.net/images/proton-neutron.jpg</a> > .....   | 12 |
| Figura 3: Ilustração representativa do esquema de um átomo radioativo (COUTO,2010)<br>(Adaptado). .....  | 17 |
| Figura 4: Representa a ilustração do espectro eletromagnético. Fonte:<br>< <a href="http://www.bosontreinamentos.com.br/wp-content/uploads/2016/07/diagrama-espectro-eletromagnetico-1024x585.png">http://www.bosontreinamentos.com.br/wp-content/uploads/2016/07/diagrama-espectro-eletromagnetico-1024x585.png</a> > ..... | 18 |
| Figura 5: Dose anual recebida e seus respectivos percentuais de acordo com as fontes<br>mais relevantes. Fonte: UNSCEAR, 2000 (Adaptado). .....  | 21 |
| Figura 6: Decaimento Radioativo da Série do $^{238}\text{U}$ (TAUHATA,2014) (Adaptado). ....   | 24 |
| Figura 7: Decaimento Radioativo da Série do $^{232}\text{Th}$ (TAUHATA,2014) (Adaptado). ..  | 25 |
| Figura 8: Esquema de Decaimento do $^{40}\text{K}$ (LOPES, 2018). .....  | 26 |
| Figura 9: Rotas dos radionuclídeos naturais no meio ambiente e exposição à externa e<br>interna - (Modificado de European Atlas of Natural Radiation,2019). .....  | 34 |
| Figura 10: Órgãos sensíveis à radiação ionizante. Fonte: Graphic News. ....  | 35 |
| Figura 11: Efeitos da radiação ionizante no DNA.<br>Fonte:< <a href="https://1.bp.blogspot.com/uTScGsjEVRc/VIT1ENiiu3I/AAAAAAAAAJs/p04r0P3OOJw/s1600/dna%2Blesivo2.png">https://1.bp.blogspot.com/uTScGsjEVRc/VIT1ENiiu3I/AAAAAAAAAJs/p04r0P3OOJw/s1600/dna%2Blesivo2.png</a> > .....  | 36 |
| Figura 12: Processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton<br>e do número atômico do material. (TAUHATA,2014) (Adaptado). .....  | 38 |
| Figura 13: Efeito Fotoelétrico. Fonte < <a href="https://www.radiation-dosimetry.org/wp-content/uploads/2019/12/Photoelectric_effect_2.jpg">https://www.radiation-dosimetry.org/wp-content/uploads/2019/12/Photoelectric_effect_2.jpg</a> > .....  | 40 |
| Figura 14: Efeito ou Espalhamento Compton. Fonte < <a href="https://pt-static-z-dn.net/files/d45/dbd4fd70478ab55e405a6265793405d7.png">https://pt-static-z-dn.net/files/d45/dbd4fd70478ab55e405a6265793405d7.png</a> > .....   | 42 |
| Figura 15: Ilustração da produção de um par elétron-pósitron. Fonte: ResearchGate<br>(Adaptado). .....   | 42 |
| Figura 16: Poder de penetração de diferentes radiações ionizantes. Fonte: Conselho<br>Regional de Farmácia de São Paulo. ....  | 44 |
| Figura 17: Número $N(t)$ de Núcleos que Ainda não Decaíram em Função do Tempo $t$  | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 18: Esquema Ilustrativo de um Cristal de Germânio em Configuração Coaxial, com Contato Tipo n na Superfície Externa ao Cristal e Janela de Entrada (CAVALCANTE, 2017).   | 58 |
| Figura 19: Diagrama de blocos de um sistema de detecção para espectrometria gama com configuração vertical. Cargas elétricas são produzidas na interação da radiação com o volume ativo do cristal (a), são processadas pelo pré-amplificador (b) e registradas pelo analisador multicanal (CAVALCANTE, 2017).  | 59 |
| Figura 20: Dewars e Criostatos (CAMBERRA, 2012).  | 61 |
| Figura 21: Em (a) a estufa e em (b) o liquidificador.   | 66 |
| Figura 22: Balança utilizada para aferir a massa das amostras.  | 67 |
| Figura 23: Em (a) temos a ilustração dos recipientes devidamente identificados e preenchidos. Em (b) os recipientes estão lacrados e as suas massas indicadas na parte superior. Em (c) temos erva cidreira. Em (d) temos hortelã. Em (e) temos alecrim. Em (f) temos cana do brejo.  | 67 |
| Figura 24: Espectrômetro Utilizado: Em (a) observa-se o “dewar”. Em (b) a blindagem do detector com baixo fundo de radiação. Em (c) O multicanal DSA 1000. Em (d) o espectro de uma amostra na tela de um computador.   | 71 |
| Figura 25: Ilustração do Sistema de Detecção (a) Ilustração do sistema de detecção com amostra posicionada sobre o cristal, instalado dentro de uma blindagem de chumbo com baixa radiação de fundo. O sistema é mantido em temperatura baixa por um reservatório de nitrogênio líquido. (b) Foto do sistema e (c) detalhes da blindagem citada e janela de carbono sobre o cristal (CAVALCANTE, 2017). | 71 |
| Figura 26: Espectro e Curva de Eficiência Gerados com o Uso de Fonte Padrão Produzida pelo LNMRI – IRD/CNEN (LOPES, 2018).  | 73 |
| Figura 27: 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 recipiente, como proposto em (a). Em (c) é possível observar a representação gráfica das inserções realizadas de acordo com a geometria requerida.   | 74 |
| Figura 28: Reta de ajuste em energia para espectrometria gama (SILVA, 2020).  | 76 |
| Figura 29: Estruturas botânicas de plantas medicinais e ornamentais analisadas.   | 85 |
| Figura 30: Distribuição em classes das faixas de concentração de atividade do $^{40}\text{K}$ nas amostras de plantas medicinais e ornamentais.   | 88 |
| Figura 31: Concentração de atividade $^{40}\text{K}$ nas estruturas botânicas das plantas analisadas para comparação e a diferença percentual.  | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 32: Concentração de atividade $^{40}\text{K}$ nas estruturas botânicas das plantas analisadas para comparação e a diferença percentual.....   | 92  |
| Figura 33: Concentração de atividade $^{228}\text{Ra}$ nas estruturas botânicas das plantas analisadas para comparação e a diferença percentual..... | 95  |
| Figura 34: Divisão percentual do grupo 1 e grupo 2. ....   | 96  |
| Figura 35: Divisão percentual das estruturas botânicas do grupo 1 e grupo 2. ....  | 96  |
| Figura 36: Distribuição em classes das faixas de concentração de atividade do $^{40}\text{K}$ nas amostras de plantas medicinais.....                | 98  |
| Figura 37: Distribuição em classes das faixas de concentração de atividade do $^{40}\text{K}$ nas amostras de plantas ornamentais. ....              | 99  |
| Figura 38: Famílias das plantas medicinais e ornamentais. ....   | 103 |
| Figura 39: Dose efetiva para $^{40}\text{K}$ nas estruturas botânicas para comparação e a diferença percentual. ....                                 | 106 |
| Figura 40: Dose efetiva para $^{228}\text{Ra}$ nas estruturas botânicas para comparação e a diferença percentual. ....                               | 108 |
| Figura 41: Acumulado de dose efetiva relativa a cada estrutura botânica. ....  | 112 |
| Figura 42: Dose absorvida acumulada para cada estrutura botânica de plantas medicinais e ornamentais analisadas. ....                                | 119 |
| Figura 43: Comparação entre os grupos das estruturas botânicas das plantas medicinais e ornamentais analisadas. ....                                 | 120 |

## Lista de Tabelas

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1: Média global da dose efetiva anual para adultos devido a fontes naturais de radiação ionizante (UNSCEAR 2000). .....         | 20  |
| Tabela 2: Dados Biocinéticos dos Radionuclídeos de Interesse.....  | 27  |
| Tabela 3: Fatores de Ponderação para Vários Tipos de Radiação Ionizante (ICRP, 2007) .....   | 54  |
| Tabela 4: Alguns Fatores de Ponderação ( $w_T$ ), para Alguns Tecidos ou Órgãos T .....  | 55  |
| Tabela 5: Dados das amostras de plantas analisadas e suas respectivas propriedades medicinais.....                                     | 62  |
| Tabela 6: Dados das amostras .....   | 68  |
| Tabela 7: Pontos Experimentais Utilizado para Ajuste Linear em Energia. Adaptado (SILVA, 2020).....                                    | 75  |
| Tabela 8: Determinação dos coeficientes de Dose Publicados pela (CNEN, 2014). ....   | 80  |
| Tabela 9: Concentração de Atividades Específicas ( $Bq.kg^{-1}$ ).....   | 82  |
| Tabela 10: Análise Quantitativa das Concentrações de Atividade .....   | 85  |
| Tabela 11: Valor de MDA ( $Bq.kg^{-1}$ ) para o $^{226}Ra$ , $^{228}Ra$ , $^{228}Th$ e $^{40}K$ referentes as amostras analisadas..... | 86  |
| Tabela 12: Análise quantitativa das doses relativas a cada grupo.....  | 97  |
| Tabela 13: Cálculo de Dose Efetiva ( $\mu Sv.ano^{-1}$ ) .....   | 104 |
| Tabela 14: Valores de Referência para dose efetiva (UNSCEAR, 2000).....  | 107 |
| Tabela 15: Análise Quantitativa das doses efetivas ( $\mu Sv.ano^{-1}$ ). .....  | 109 |
| Tabela 16: Dose Efetiva Acumulada em Alguns Órgãos do Tecido Humano.....   | 109 |
| Tabela 17: Cálculo do risco de câncer ( $10^{-6}$ ). .....   | 113 |
| Tabela 18: Análise do Risco de Câncer para cada Radionuclídeo. ....  | 114 |
| Tabela 19: Cálculo da dose absorvida e da dose efetiva externa.....  | 115 |

# **CAPÍTULO 1**

## **Introdução**

### **1.1. Considerações Gerais**

Desde os primórdios da formação do Universo, o globo terrestre esteve submetido a doses de radioatividade natural, proveniente da radiação cósmica e da interação deste tipo de radiação com gases existentes na atmosfera (radiação secundária), além do decaimento de radionuclídeos de origem natural. As fontes naturais produzem a maior contribuição, a exposição à radiação recebida pelos indivíduos. A radioatividade é um fenômeno de ocorrência natural, e praticamente todos os materiais contêm núclídeos radioativos, embora geralmente em concentrações muito baixas. Assim, a água os alimentos consumidos, o ar inspirado, os solos, os radionuclídeos estão em todos os lugares (GARCÊZ, 2016).

Radionuclídeos podem ser definidos como núcleos radioativos. Tudo que existe na natureza é feito de átomos. Sendo talvez o ente mais sociável do universo, o átomo ocorre sempre em combinação com outro átomo ou com um grupo de átomos. Tais combinações formam moléculas (OKUNO,2018). O átomo é constituído por um núcleo que contém dois tipos de partículas, de massas aproximadamente iguais, prótons e os nêutrons. Além disso, fora do núcleo existem as camadas eletrônicas, onde os elétrons estão distribuídos em níveis de energia.

A análise das relações químicas entre os vários elementos radioativos resultou na descoberta de isótopos. Descobriu-se que o bombardeio de átomos com partículas  $\alpha$  rápidas a partir de substâncias radioativas causava a desintegração de núcleos atômicos, e isto levou por sua vez à descoberta do nêutron e à teoria corrente da composição do núcleo (DUARTE,2011). Os nêutrons são partículas sem carga e não produzem ionização diretamente. Em sua interação com a matéria, liberam partículas carregadas que vão ionizar o meio, são muito penetrantes, podem ser blindados com materiais ricos em hidrogênio, tais como parafina e água (OKUNO,2018).

O controle da radioatividade no meio ambiente, é necessário para obtermos informações referentes à exposição às fontes radioativas naturais nos indivíduos, na fauna e na flora de um determinado ecossistema. Elementos radioativos estão presentes em

toda natureza e permeiam o espaço. As diversas formas de vida estão expostas a certas quantidades de radiação ionizante, que estão presentes no ar, solo e água. Esta quantidade de radiação ionizante é chamada de background ou radiação de fundo, que varia de um lugar para outro (GARCÊZ, 2016).

Quando a radiação possui energia suficiente para arrancar um dos elétrons orbitais de átomos de um dado meio, transformando-os em um par de íons, diz-se que ela é uma radiação ionizante (OKUNO, 2018). A radiação ionizante pode arrancar qualquer elétron de um átomo se tiver energia maior que a de ligação dele ao átomo (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). Os riscos que as radiações ionizantes podem causar nos seres humanos, pode estar relacionada a fatores, como dose absorvida, taxa de exposição e a forma com que o indivíduo foi exposto.

A presença de radionuclídeos em plantas medicinais e ornamentais, nos leva a um olhar mais cuidadoso, devido ao fato de um potencial impacto desses elementos na saúde humana e no meio ambiente. Nas plantas medicinais o controle desses radionuclídeos é importante não apenas para segurança dos consumidores, mas também para a preservação da integridade e eficácia dos tratamentos à base dessas plantas. No caso das plantas ornamentais, podem atuar como bioindicadores eficazes na detecção de contaminação ambiental por radionuclídeos. Devido a elevada capacidade de absorção de elementos químicos do solo, água e atmosfera, essas plantas acumulam radionuclídeos como o  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{232}\text{Th}$  em seus tecidos. A análise da concentração de atividade desses elementos nas partes vegetativas permite inferir a presença e o grau de contaminação radioativa do ambiente.

Entende-se por plantas medicinais aquelas que possuem, em um ou mais órgãos, substâncias utilizadas com finalidade terapêutica, ou que sejam ponto de partida para a síntese de produtos químicos e farmacêuticos. E os compostos quimicamente ativos responsáveis pela ação terapêutica são denominados “princípios ativos” (MARTINS et.al; 2003).

Plantas ornamentais são aquelas cultivadas preferencialmente por suas características estéticas, como a beleza das flores, folhas, caules, frutos ou seu porte, são amplamente utilizadas para paisagismo e decorações. São valorizadas não apenas por suas belezas visuais, mas também pela capacidade de harmonização de determinados ambientes, contribuindo para o bem-estar humano. São aquelas cultivadas com o objetivo

principal de embelezar ambientes, seja pela sua forma, coloração, textura ou aroma (LORENZI; SOUZA, 2001).

O consumo de plantas contaminadas com radionuclídeos podem resultar na exposição interna à radiação, o que aumenta o risco de efeitos deletérios à saúde, como o câncer. A ingestão de alimentos ou chás feitos a partir dessas plantas podem contribuir para a dose de radiação recebida por um indivíduo ao longo da vida, efeito estocástico. Com isso é necessário monitorar os níveis de radionuclídeos em plantas medicinais e ornamentais para garantir que não ultrapassem os limites estabelecidos pelos órgãos reguladores, como a comissão internacional de proteção radiológica (ICRP).

O Brasil abriga mais de 55 mil espécies de plantas, aproximadamente um quarto de todas as espécies conhecidas no mundo. Quanto maior o número de espécies, maior o potencial de novos medicamentos. Apesar dessa vasta biodiversidade, estima-se que apenas cerca de 5 mil espécies tenham sido estudadas quanto ao seu uso medicinal (MMA, 2024). Diante deste cenário é relevante um estudo mais aprofundado sobre a diversidade de plantas medicinais ingeridas pelos indivíduos, bem como o monitoramento de radionuclídeos existentes.

Para a análise radiométrica das amostras coletadas, utilizou-se a técnica de espectrometria gama, um método não destrutivo que garante a integridade e a preservação das respectivas amostras, além de identificar diferentes tipos de radionuclídeos em uma mesma medição. Através de um detector HPGe de alta resolução, foi analisado radionuclídeos presentes em amostras de plantas medicinais e ornamentais, assim como a atividade mínima detectável dos radionuclídeos de maior relevância, são eles  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  que eventualmente o ser humano está exposto.

## **1.2. Justificativa**

Estudar a presença de elementos radioativos em plantas medicinais e ornamentais se torna importante por diversas razões que estão relacionadas à saúde pública, segurança ambiental, controle de qualidade nos produtos provenientes das plantas medicinais que serão ingeridas e como as plantas ornamentais de alguma forma podem entrar no ciclo da cadeia alimentar.

Estes elementos radioativos podem entrar na cadeia alimentar através de várias vias, incluindo a contaminação do solo, da água e dos fertilizantes utilizados no cultivo



de alimentos. Em alguns casos, as plantas absorvem naturalmente esses elementos do solo, ou a contaminação pode ser resultado da atividade humana, como mineração, além do uso de fertilizantes.

O risco associado à presença de elementos radioativos em plantas medicinais quando ingeridas, está na exposição interna à radiação, que pode elevar as chances de surgimento de doenças, como o câncer, além de causar danos ao sistema nervoso. A acumulação desses radionuclídeos nos órgãos pode alterar suas funções, induzir mudanças morfológicas e bioquímicas, e causar danos radiológicos de várias naturezas (AKHTER et al., 2007; ASADUZZAMAN et al., 2015; NAHAR et al., 2018).

Além disso, muitos elementos radioativos têm meias-vidas longas o que significa que eles permanecem ativos por um longo período de tempo no ambiente e no corpo humano, aumentando ainda mais os riscos potenciais à saúde (JIBITI et al., 2007).

Para garantir a segurança dos consumidores, várias agências reguladoras de saúde em todo o mundo impõem limites estritos para a quantidade de elementos radioativos permitidos. No entanto, as plantas medicinais são amplamente utilizadas na fitoterapia e na medicina tradicional. É importante garantir que os consumidores estejam livres desses riscos, fiscalizando e obedecendo as normas vigentes, assim é uma forma de proteger os consumidores.

O cuidado com a estrutura do solo em regiões onde essas plantas são cultivadas é um fator preponderante para a diversidade das espécies. A presença de radionuclídeos em plantas medicinais e ornamentais pode ser um indicador de contaminação ambiental. Estudar o processo de contaminação pode ajudar a mitigar a poluição proveniente da radiação no solo, água e ar. Algumas plantas medicinais e ornamentais são espécies endêmicas e possuem um papel importante para a biodiversidade da região. A contaminação pode acarretar na saúde dessas plantas e consequentemente colocar em risco a biodiversidade daquela região.

Compreender os níveis de radionuclídeos presentes em plantas medicinais e ornamentais permite realizar avaliações de riscos com mais eficiência, orientando sobre o uso mais seguro das plantas, além de fornecer dados científicos necessários para formulação de políticas públicas e regulamentações que garantam a segurança dos consumidores e a qualidade das plantas.

### 1.3. Objetivo

O objetivo desse estudo é determinar a concentração de atividade específica dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$  presentes em plantas medicinais e ornamentais. Estimar a dose efetiva e o risco de câncer referente a ingestão de plantas medicinais devido a esses radionuclídeos a partir dos dados de coeficientes de conversão da publicação 119 da ICRP (2012) e posteriormente comparar com resultados disponíveis na literatura. Estimar a dose absorvida e a dose efetiva externa para o conjunto de plantas medicinais e ornamentais. Para a aquisição dos dados, foi utilizando a técnica de espectrometria gama de alta resolução em um detector de germânio hiper-puro (HPGe), tipo semiconductor.

## **CAPÍTULO 2**

### **Fundamentação Teórica**

#### **2.1. Estrutura da Matéria**

##### **2.1.1. Os Elementos e os Átomos**

Embora a complexidade do universo pareça um tanto quanto ilimitada, ela tem origem na simplicidade fundamental na qual a ciência buscava descrever. Ao observarmos tudo em nossa volta, pessoas, os oceanos as montanhas os rios e toda a infinidade de elementos que constituem a natureza, o papel da ciência foi de fato mostrar que tudo era constituído por uma certa quantidade de entidades simples.

O primeiro conceito de átomo surgiu com os antigos gregos Leucipo de Mileto e seu discípulo Demócrito de Abdera, ao redor do ano 450 a.c (OKUNO; YOSHIMURA,2010). Demócrito foi um filósofo grego pré-socrático nascido em Abdera, uma cidade na costa norte do mar Egeu, na Grécia antiga. Ele é conhecido principalmente por sua teoria atômica, que propôs a ideia de que a matéria é composta de partículas indivisíveis chamadas átomos.

Desenvolveu uma teoria de que a matéria é composta por partículas minúsculas e indivisíveis, no qual foi concebido a partir do fato de que, se uma dada substância fosse dividida indefinidamente, chegar-se-ia à matéria elementar, a qual deram o nome de atomon, constituinte de toda matéria, que significa indivisível (OKUNO; YOSHIMURA,2010).

Ele acreditava que diferentes substâncias eram compostas por diferentes átomos ou combinações de átomos, e que por meio de rearranjo de átomos poderia ser convertida formando diferentes substâncias. Esta ideia foi uma das primeiras tentativas de explicar a natureza fundamental da matéria.

A filosofia de Demócrito é associada ao atomismo, uma escola de pensamento que postula a existência de átomos como constituintes básicos da realidade da matéria. De acordo com Demócrito, as propriedades das substâncias são determinadas pelas diferentes formas, tamanhos e arranjos dos átomos que as compõem.

As ideias de Demócrito influenciaram muitos outros filósofos e cientistas ao longo da história. Seu conceito de átomos como unidades indivisíveis da matéria antecipou ideias semelhantes desenvolvidas posteriormente na ciência moderna.

O legado de Demócrito na história é significativo, especialmente por sua influência no desenvolvimento da ciência e na compreensão da natureza da matéria. Embora suas ideias sobre os átomos tenham sido inicialmente especulativas e não baseadas em evidências experimentais, elas pavimentaram o caminho para futuras investigações científicas sobre a estrutura da matéria.

Os átomos são os “blocos” fundamentais da matéria, constituindo tudo o que vemos ao nosso redor. Eles são unidades básicas de elementos químicos e são compostos por partículas subatômicas. Átomos são os blocos básicos na construção da matéria (J.P. McEvoy, OSCAR ZARATE, 2012).

Os Gregos antigos tinham a mesma ideia. Eles pensavam que havia quatro elementos – Terra, ar, fogo e água – que podiam produzir todas as outras substâncias quando combinados nas proporções corretas. Porém, com base em experimentos, sabe-se que na verdade existe 118 elementos, os quais – em diversas combinações – compõem toda a matéria da Terra (ATKINS, 2018).

Átomos podem se ligar entre si para formar moléculas, através de ligações químicas. Essas ligações ocorrem quando os elétrons são compartilhados ou transferidos entre os átomos, formando estruturas estáveis. Essa capacidade dos átomos se combinarem de diferentes maneiras é fundamental para a química e para a variedade de substâncias que encontramos na natureza.

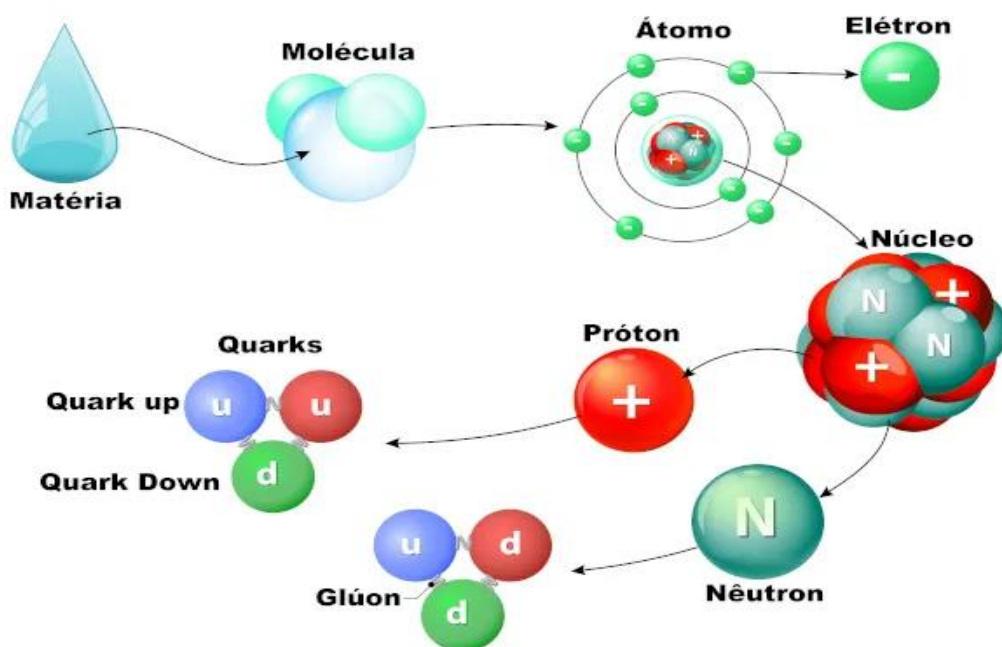
A necessidade de invocar a hipótese da estrutura corpuscular da matéria, somente ocorreu no final do século XVIII, quando da descoberta das leis químicas das proporções definidas por Proust (1754-1826) e das proporções múltiplas por Dalton (1766 -1844). Essas leis conduziram, de forma natural, à consideração de que quando substâncias elementares se combinam, o fazem como entidades discretas ou átomos (TAUHATA,2014).

O desenvolvimento do modelo atômico moderno deu o primeiro passo com argumento convincente, baseado em experimentos, não em especulações, foi apresentado em 1807 pelo químico inglês John Dalton. Ele mediu muitas vezes a razão entre as massas

dos elementos que se combinam para formar as substâncias a que chamamos de “compostos” e verificou que as razões entre as massas mostravam uma tendência (ATKINS,2018).

Um determinado composto químico é sempre formado pelos mesmos elementos químicos combinados sempre na mesma proporção em massa, independentemente de sua procedência ou método de preparação (TAUHATA,2014).

Toda a matéria é feita de várias combinações de formas simples da matéria, chamadas de elementos químicos. Um elemento é uma substância formada por um único tipo de átomo (ATKINS, 2018). A figura 1 ilustra as estruturas que constituem a matéria.



**Figura 1:** Ilustração representativa das estruturas que constituem a matéria

Hoje, sabemos que o átomo é constituído por uma região central, pequena em relação ao átomo, que contém prótons e nêutrons e é responsável pela maior parte de sua massa a qual chamamos de núcleo. Os elétrons são também constituintes dos átomos. Eles residem em uma região fora do núcleo chamado de orbital. Contudo existem partículas subatômicas que compõem os prótons e os nêutrons que são chamados de quarks. A primeira partícula subatômica foi introduzida teoricamente em 1891, George

Johnstone Stoney batizou-a com o nome de elétron. A palavra elétron significa certa quantidade de carga elétrica (OKUNO, YOSHIMURA,2010).

Em 1897, Joseph John Thomson através de experimento conseguiu medir a razão carga- massa do elétron ( $e/m$ ). Com a experiência da gota de óleo, Robert Andrew Millikan no ano de 1909 determinou a carga do elétron (OKUNO, YOSHIMURA,2010).

No ano de 1920, Ernest Rutherford propôs o nome próton, que vem do grego protos (primeiro), para outra partícula subatômica, constituinte do núcleo, com carga positiva e massa 1840 vezes maior que a do elétron (RESNICK, 1979).

Discípulo de Rutherford, James Chadwick como um dos resultados das pesquisas sobre desintegração ou transmutação de núcleos por partículas alfa, descobriu o nêutron no ano de 1932. O nêutron tem aproximadamente a mesma massa do próton e também é constituinte do núcleo. Com isso, levando em consideração que o núcleo era constituído de prótons e nêutrons, a hipótese foi pela primeira vez usada como base em uma teoria detalhada do núcleo por Heisenberg naquele mesmo ano. Assim foi possível compreender a emissão da radiação gama por núcleos excitados, devido sua alta energia e sua grande facilidade de penetração em materiais orgânicos (OKUNO, YOSHIMURA,2010).

Após alguns anos em 1963, Murray – Gell – Mann e George Zweig, propuseram de forma independente, a existência de partículas ainda menores chamadas de quarks. Hoje estas entidades são consideradas indivisíveis e, portanto, designadas partículas elementares, assim como os elétrons. Até a proposta da existência de quarks, os prótons e nêutrons também eram considerados partículas elementares (OKUNO, YOSHIMURA,2010).

Partículas elementares são aquelas que não possuem estrutura interna detectável, ou seja, até o momento, por meio de experimentos específicos e análises detalhadas, não há indícios de que sejam constituídas por partículas mais fundamentais (MIZRAHI, GALETTI, 2016).

### 2.1.2. Modelo Nuclear

Dalton concebia os átomos como se fossem esferas perfeitas, como as bolas de bilhar. Hoje, sabemos que os átomos têm estrutura interna: eles são constituídos de partículas subatômicas, ainda menores. Ao investigar a estrutura interna dos átomos, é possível perceber por que os elementos diferem uns dos outros (ATKINS,2007). Essa diferença se dá pelo tipo de cada partícula subatômica que constitui os átomos do elemento.

A primeira evidência experimental da estrutura interna dos átomos foi descoberta, em 1897, da primeira partícula subatômica, o elétron. O físico britânico J.J. Thomson estava investigando os “raios catódicos”, isto é, os raios emitidos quando grande diferença de potencial (alta voltagem ou alta tensão) é aplicada entre dois eletrodos (contatos metálicos) em um tubo de vidro sob vácuo (ATKINS,2007).

Joseph John Thomson (1856-1940), descobriu o elétron e apresentou um modelo para o átomo conhecido como Pudim de Ameixa. Elétrons e prótons coexistem dentro de uma casca esférica e estão estacionários em relação uns aos outros. De outra maneira: Uma esfera vazia carregada positivamente com os elétrons estacionários, cancelando a carga positiva. O átomo de Thomson explicava a neutralidade da matéria, a teoria cinética dos gases e a radiação beta ( $\beta$ ). Entretanto não explicava a emissão da partícula alfa ( $\alpha$ ), as linhas espectrais e o espalhamento de um feixe de partículas  $\alpha$ . A partícula indivisível (átomo) começa a ser questionada.

Meia dúzia de anos após Einstein ter enunciado sua explicação para o efeito fotoelétrico, o físico britânico nascido na Nova Zelândia Ernest Rutherford (1871-1937) supervisionou seu hoje famoso experimento da folha de ouro. Esse experimento significativo revelou que o átomo é praticamente um espaço vazio, com a maior parte de sua massa concentrada na região central – o núcleo atômico (HEWITT,2011).

No experimento de Rutherford, um feixe de partículas positivamente carregadas (partículas alfas) provenientes de uma fonte radioativa era direcionado contra uma folha de ouro extremamente fina. Uma vez que as partículas alfas possuem massa milhares de vezes maior do que a dos elétrons, esperava-se que o feixe de partículas alfa não seria impedido de atravessar os “pudins atômicos”. Isso de fato foi observado – para maior parte (HEWITT,2011).

No modelo de Rutherford para a estrutura do átomo, todas as cargas positivas desse átomo, e conseqüentemente toda sua massa, são supostas concentradas em uma pequena região no centro chamada núcleo (RESNICK,1979).

Quase todas as partículas alfa ( $\alpha$ ) passaram pela folha de ouro com pouca ou nenhuma deflexão e produziram pontos brilhantes quando colidiram com uma tela fluorescente colocada no lado oposto da folha. No entanto, algumas partículas desviaram-se da sua trajetória retilínea original quando saíram da folha. Alguns deles foram em grande parte desviados e menos ainda voltaram dispersos. Estas partículas alfa devem ter colidido com algo de massa relativamente grande. Rutherford concluiu que as partículas não desviadas passaram pelos vazios da folha de ouro, mas as poucas partículas desviadas pela massa central muito densa e carregada positivamente. Ele concluiu que cada átomo deveria conter uma dessas massas, que Rutherford chamou de núcleo (HEWITT,2011).

Niels Bohr (1885- 1962), físico de naturalidade Dinamarquesa, em 1912, já possuindo o título de Doutor em física, foi trabalhar no laboratório de Rutherford. Bohr tinha interesse pelos estudos desenvolvidos por Max Planck, que pesquisava fenômenos completamente desconhecidos naqueles tempos. Baseando-se nas considerações teóricas desenvolvidas por Planck, Niels Bohr enunciou os postulados da nova teoria atômica elaborada por ele (OKUNO, YOSHIMURA,2010).

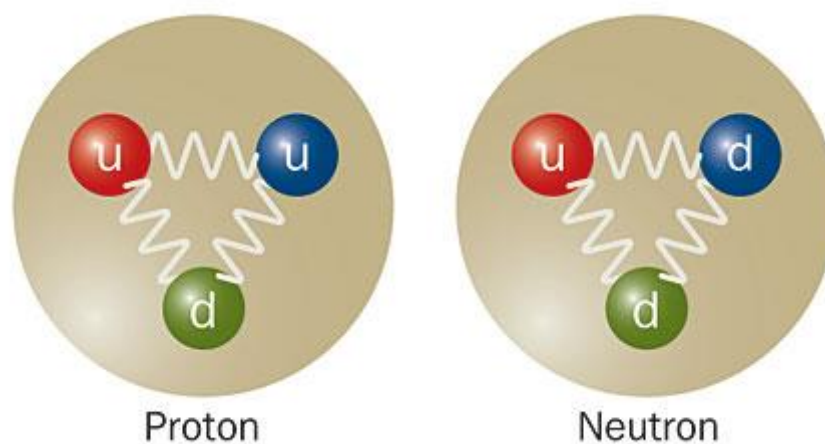
De acordo com Bohr os elétrons giram em torno do núcleo em órbitas circulares e, ao fazê-lo, não irradiam energia. Quando um elétron passa de uma órbita para outra, ele emite energia, salto de uma camada para outra mais interna ou absorve energia, salto de uma camada para outra mais externa. A energia emitida ou absorvida por um sistema atômico não é contínua. Ela é descrita pelas leis da mecânica quântica, portanto ocorre pela transição do sistema de um estado estacionário para algum outro diferente (OKUNO, YOSHIMURA,2010).

O modelo nuclear atual, um átomo é formado por um núcleo que contém dois tipos de partículas, de massas aproximadamente iguais, o próton que carrega uma unidade de carga elétrica positiva, e o nêutron que é desprovido de carga. Ambas são partículas subnucleares ou subatômicas. Um átomo ou um núcleo de uma determinada espécie é chamado de nuclídeo, os nuclídeos se distinguem uns dos outros pelo número de prótons Z (o número atômico) e de nêutrons N que seu núcleo contém (MIZRAHI, GALETTI, 2016).



Podemos descrever o núcleo como sendo constituído por prótons e nêutrons, os quais são chamados coletivamente de núcleons. Os prótons têm como carga elétrica resultante positiva, enquanto os nêutrons têm como carga elétrica resultante nula, ou seja, neutra. As partículas elementares da matéria são chamadas de quarks, entidades que formam os prótons e os nêutrons que constituem o núcleo.

Por possuírem certas propriedades semelhantes, mas ainda assim claramente distinguível devida à carga elétrica o próton e o nêutron são vistos como uma mesma partícula, porém em diferentes estados, ou seja, pode-se considerar que espectroscopicamente o próton é o estado fundamental do núcleon e o nêutron é o primeiro estado excitado, pois no estado livre seu tempo de vida média é de cerca de 15 minutos, decaindo para próton por interação fraca (MIZRAHI, GALETTI, 2016). Na atualidade está sendo corroborado pelo modelo de quarks para a representação das partículas subnucleares. Os quarks são partículas elementares que, no chamado modelo padrão, entram na composição dos núcleons e de outras partículas subnucleares. São 6 quarks: up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t) e bottom (b). A figura 2 representa os núcleons e as partículas que as constituem.



**Figura 2:** Representa os núcleons e as partículas subatômicas que as constituem os quarks. Fonte:< <https://www.valdiraguilera.net/images/proton-neutron.jpg>>

A força nuclear forte é extremamente poderosa, superando a repulsão elétrica entre os prótons. Ela é responsável por manter o núcleo unido, mesmo quando os prótons

dentro dele estão tentando se afastar devido à força eletroestática repulsiva. A estabilidade ou instabilidade de um núcleo é determinada pela competição da força de atração nuclear entre os prótons e os nêutrons com a força de repulsão elétrica entre os prótons (YOUNG E FREEDMAN,2009).

Além disso, o modelo nuclear prevê que a energia de ligação nuclear, que é a energia necessária para desfazer completamente o núcleo atômico em seus prótons e nêutrons constituintes, é muito alta em comparação com outras formas de energia. Essa energia de ligação é o que torna os núcleos atômicos estáveis e impede que eles se desintegram espontaneamente.

No entanto, alguns núcleos são instáveis e passam por decaimento radioativo, onde emitem partículas ou radiação para se transformarem em núcleos mais estáveis. Esse fenômeno é fundamental para entender a radioatividade. Os núcleos instáveis decaem, ou seja, transformam-se espontaneamente em outras estruturas por meio de diversos tipos de decaimento (YOUNG E FREEDMAN,2009).

## **2.2. Propriedades Gerais dos Núcleos**

A estrutura do núcleo atômico é algo bastante complexo. Suas propriedades somente são conhecidas por métodos indiretos como, acompanhar o espalhamento de partículas que nele são incididas. O conhecimento atual permite explicar satisfatoriamente a estabilidade ou a instabilidade de certos núcleos, juntamente com o comportamento dos seus núcleons. O estudo das propriedades dos núcleos atômicos é fundamental para a compreensão da física nuclear, das reações nucleares e da radioatividade. Os núcleons tem um papel importante para a descrição dos estados quânticos dos núcleos. Diferentemente da descrição de partículas na física clássica, no tratamento quântico as partículas possuem propriedades adicionais e inéditas que são: O momento angular intrínseco ou spin, a paridade intrínseca e a indistinguibilidade de partículas idênticas (MIZRAHI, GALETTI,2016).

O spin quântico foi descoberto pelos físicos alemães Otto Stern e Walther Gerlach em 1922, durante uma experiência que sugeria que os elétrons nos átomos também possuem um momento angular intrínseco, além do gerado por seu movimento orbital. A direção do spin quântico das partículas determina sua orientação magnética (CLEGG, 2018). O spin é próprio das partículas elementares e subatômicas, entretanto também estão presentes nos núcleos, nos átomos e nas moléculas. O spin quântico está relacionado

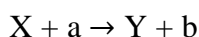
ao momento angular, propriedade física atribuída aos objetos rotativos, porque afeta a medição do momento angular e resulta da soma vetorial dos spins dos núcleons individuais e de seus movimentos orbitais. O spin quântico é o que faz os ímãs funcionarem e permite diferenciarmos uma partícula da outra.

A paridade de um estado nuclear é uma propriedade quântica e é atribuída a partir do comportamento da função de onda associada ao núcleo sob a inversão das coordenadas espaciais. Se a função de onda  $\Psi(r)$  associada ao núcleo permanecer inalterada quando suas coordenadas espaciais são invertidas, então o estado tem paridade positiva. Se, por outro lado, a função de onda muda de sinal sob a inversão das coordenadas espaciais, o estado tem paridade negativa (SAKURAI; NAPOLITANO, 2017). A paridade é conservada em interações nucleares fortes e eletromagnéticas, o que significa que a paridade do sistema antes e depois de uma interação nuclear é conservada, ou seja, permanece a mesma. Esta conservação exerce um papel crucial na determinação dos possíveis estados finais provenientes de reações nucleares e decaimentos.

Em 1956, os então jovens físicos C.N. Yang e T.D. Lee propuseram um experimento para verificar se, de fato, nas interações fracas (decaimentos  $\beta$ ) a paridade total é conservada. Em 1957 esta proposta foi considerada e o experimento conduzido por Chien Shiung Wu e seus colaboradores demonstraram que, nas interações fracas, os processos nucleares não exibem simetria especular revolucionando o entendimento das leis de conservação (MIZRAHI, GALETTI, 2016). A descoberta da violação da paridade em interações fracas, foi um marco relevante na física moderna.

### **2.3. Reações Nucleares**

Uma reação nuclear ocorre quando um certo núcleo sofre uma modificação em sua estrutura podendo também ter sua energia alterada, em consequência de ter sido atingido por partículas que podem ser nêutrons, prótons, mésons, partículas ( $\alpha$ ), raios  $\gamma$ , elétrons, pósitrons, ou mesmo outros núcleos. Nesses casos, a reação nuclear é um processo induzido e não espontâneo. Em uma reação nuclear são conservados o momento linear, a energia, a carga elétrica, a paridade, o momento angular total e o número total de núcleons ou número bariônico (MIZRAHI, GALETTI, 2016). Podemos representar uma reação nuclear de maneira genérica da seguinte forma:



Onde uma partícula a incide sobre um núcleo X, obtendo como produto dessa reação Y e b. Representaremos a energia cinética do núcleo e da partícula incidente respectivamente como  $T_x$  e  $T_a$ . De forma análoga representaremos as energias cinéticas dos produtos como sendo  $T_y$  e  $T_b$ . Sabemos da teoria da relatividade que além da energia cinética, as partículas envolvidas na reação possuem energias de repouso, e consequentemente as respectivas energias de repouso da seguinte forma:

$$m_a c^2, m_x c^2, m_y c^2 \text{ e } m_b c^2$$

Onde  $m_a, m_x, m_y, m_b$  são as massas de repouso das partículas envolvidas na reação. Como a energia total no processo é conservada, temos que a energia total antes da reação deve ser igual a energia total depois da reação, assim temos a seguinte configuração:

$$m_x c^2 + T_x + m_a c^2 + T_a = m_y c^2 + T_y + m_b c^2 + T_b$$

Reescrevendo a equação, temos (equação 1):

$$(m_x + m_a - m_y - m_b).c^2 = T_y + T_b - T_x - T_a \quad (\text{equação 1})$$

$$m_x + m_a = m_i$$

$$m_y + m_b = m_f$$

$$T_y + T_b = T_f$$

$$T_x - T_a = T_i$$

Definiremos agora uma quantidade importante que caracteriza a reação do ponto de vista energético. Podemos descrever uma reação de acordo com seu valor de Q.

$$(1) Q = T_f - T_i : \text{ Em relação a diferença de energia; } \quad (\text{equação 2})$$

$$(2) Q = (m_x + m_a - m_y - m_b).c^2 : \text{ Em relação a diferença de massa; } \quad (\text{equação 3})$$

Se  $Q > 0$  a reação é dita exotérmica, a energia interna liberada transforma-se em energia cinética dos produtos da reação y e b, se estiverem no estado fundamental.

Se  $Q < 0$  a reação é dita endotérmica, ou seja, estando o núcleo x em repouso em algum referencial, a energia cinética de a é maior que a soma das energias cinéticas dos produtos da reação y e b. Assim, parte da energia cinética de a transformasse em energia

interna dos constituintes y e b, e a fração restante é transportada como energia cinética (MIZRAHI, GALETTI, 2016).

## **2.4. Estabilidade Nuclear**

A principal fonte de interação para manter a estabilidade dos núcleos é a força nuclear forte. Ela age de forma intensa promovendo atração entre os prótons-nêutrons, nêutrons-neutros e prótons- prótons para distâncias muito pequenas da ordem de  $10^{-15}m$ , entretanto é praticamente nula para distâncias superiores. Os prótons e nêutrons se organizam em orbitais, em níveis de energia, sob a ação do campo de forças intensas e de curto alcance. Não existe correlação entre orbitais e trajetórias geométricas, mas entre orbitais e energia das partículas. A base da organização dos núcleons no espaço nuclear é o princípio de Exclusão de Pauli (TAUHATA,2018).

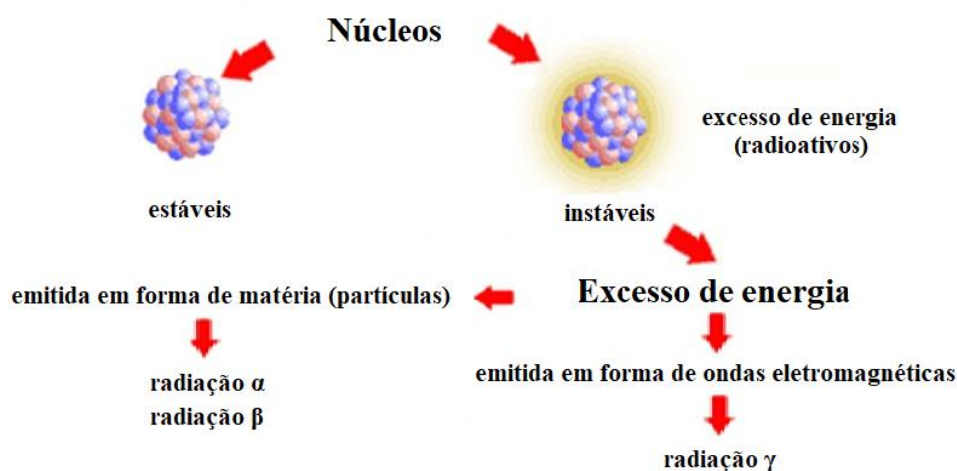
A força de repulsão eletroestática é uma força de alcance ilimitada e inversamente proporcional ao quadrado da distância de separação. Para núcleos pesados a força nuclear forte de atração para próton-próton que estão mais afastados um em relação ao outro, ou seja, por distâncias superiores a ordem de  $10^{-15}m$  é muito menor que a força de repulsão eletroestática de modo a provocar instabilidades, tal que os núcleos mais leves são mais estáveis em relação aos núcleos mais pesados. Os núcleos mais leves são aqueles que o número de prótons e nêutrons são aproximadamente iguais sendo o motivo pelo qual há mais estabilidade para esses tipos de núcleo. Todavia, à medida que a massa nuclear aumenta o número de nêutrons cresce para tentar equilibrar a força de repulsão eletroestática, de modo que os núcleos mais pesados têm um número maior de nêutrons em relação ao número de prótons (GONÇALVES,2023).

Podemos dizer que os núcleos mais estáveis são aqueles cujo número de prótons são aproximadamente iguais aos nêutrons. A energia de ligação também é um fator preponderante para a estabilidade nuclear, visto que quanto maior ela for, maior será a energia necessária para extrair um fragmento do núcleo. Outra maneira de se obter a estabilidade nuclear é através do decaimento de núcleos instáveis, ou seja, núcleos com excesso de energia, seja por emissão de partículas e ou emissão de fótons, a todos esses núcleos denominamos de radioativos. Os núcleos com mais de 83 prótons (Bismuto) são instáveis, pois mesmo com o aumento do número de nêutrons a força nuclear forte não consegue sobrepor a força de repulsão eletrostática.

## 2.5. Instabilidade Nuclear e Radioatividade

Existem dois tipos de núclídeos, os naturais e artificiais. Através de observações referentes ao comportamento desses núclídeos, podemos verificar que nem todos são estáveis. Os núclídeos instáveis ou radioativos também chamado de radionuclídeos, são aqueles que sofrem desintegração nuclear ou decaimento nuclear de maneira espontânea, originando partículas subatômicas ou radiação eletromagnética e formam um novo núcleo estável (YOUNG e FREEDMAN,2009). Esse processo é conhecido como radioatividade.

Essa instabilidade do núcleo resulta em uma desintegração ou transmutação, ou seja, esse núcleo instável sofre uma transformação, perdendo sua identidade original, decaindo por emissões alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) ou gama ( $\gamma$ ), ou, mais raramente, por emissão de um núcleon ou um dêuteron. Segundo o dicionário Houaiss Física (de I.Roditi, Editora Objetiva) indica que os verbos decair e desintegrar- se possuem o mesmo sentido físico (MIZRAHI,2016). Essas partículas podem ser emitidas basicamente a partir de três processos de decaimento citados acima. Decaimento alfa (emissão de partícula alfa), decaimento beta (emissão de partícula beta) e decaimento gama (emissão de partícula gama). A figura 3 traz a ilustração do esquema de um átomo radioativo.

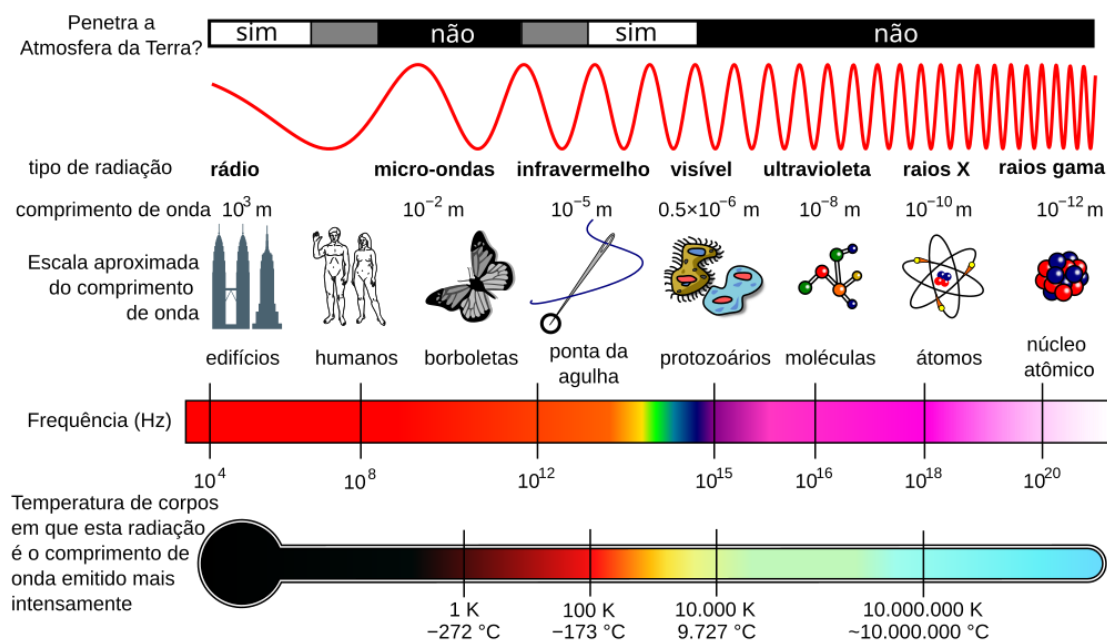


**Figura 3:** Ilustração representativa do esquema de um átomo radioativo (COUTO,2010) (Adaptado).

Um núcleo radioativo pode ser caracterizado pela sua constante de decaimento que é característica de cada elemento, meia- vida que é o tempo durante o qual a amostra

do material radioativo é reduzida à metade da sua massa inicial e pela vida média onde é considerada a média ponderada dos tempos de vida de cada núcleo da amostra (TAUHATA,2014).

Devido aos decaimentos radioativos, são emitidos de forma espontânea partículas tais como, partículas alfa, elétrons e pósitrons. A radiação pode também se manifestar em forma de onda eletromagnética que advém da oscilação de campos elétrico e magnético, perpendiculares entre si e que se propagam em qualquer meio. No vácuo, sua velocidade de propagação é de  $3 \cdot 10^8$  m/s, conhecida como velocidade da luz e diferem entre si nas suas frequências e pelo comprimento de onda. A classificação das ondas eletromagnéticas, baseada na frequência, constitui o espectro eletromagnético (HEWITT,2011). Em ordem crescente de frequência, são exemplos de onda eletromagnéticas, ondas de rádio, de TV, micro-onda, radiação infravermelha, luz visível, radiação ultravioleta, raios X e raios gama. A energia de uma onda eletromagnética é uma energia quantizada, isto é, não pode ter qualquer valor, mas somente alguns valores ditos discretos (OKUNO,2018). A figura 4 ilustra o espectro eletromagnético.



**Figura 4:** Representa a ilustração do espectro eletromagnético. Fonte:

<<http://www.bosontreinamentos.com.br/wp-content/uploads/2016/07/diagrama-espectro-eletromagnetico-1024x585.png>>

## 2.6. Radioatividade Natural

A radioatividade natural, também conhecida como radiação de fundo (BG, sigla de background), refere-se à radiação ionizante que está presente no meio ambiente devido à presença de radionuclídeos existentes na crosta terrestre, e pela exposição à radiação cósmica, ocorre de forma contínua e independente de fontes artificiais. A radioatividade terrestre pode ser classificada em três categorias principais: 1<sup>a</sup>- os radionuclídeos primordiais, que possuem meias-vidas longas e estão presentes na superfície terrestre desde a sua formação, 2<sup>a</sup> os secundários, que são produtos do decaimento dos radionuclídeos primordiais, e 3<sup>a</sup> os cosmogênicos, que são continuamente gerados pelo bombardeamento de núclídeos estáveis por raios cósmicos na atmosfera. Entre os radionuclídeos primordiais ainda existentes,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  e  $^{40}\text{K}$  destacam-se por terem meias-vidas comparáveis à idade da Terra (EISENBUD; GESELL,1997).

O nível de radiação na Terra hoje é menor do que há quatro bilhões de anos, devido ao decaimento dos radionuclídeos naturais presentes no planeta. Esses radionuclídeos incluem elementos das séries do urânio e do tório encontrados no ambiente, dos quais o radônio é um dos descendentes. O radônio é um gás pesado que emite partículas alfa e é responsável por quase metade da dose de radiação absorvida pelo corpo (OKUNO,2018).

Quando nosso corpo é exposto à radiação proveniente de fontes externas, essa exposição é chamada de externa. Por outro lado, quando a radiação é originada de dentro do corpo, devido à presença de átomos radioativos ingeridos através de alimentos, água ou ar, a exposição é denominada interna. Nesse caso, aproximadamente 250 mil átomos radioativos se desintegram a cada minuto em nosso corpo, emitindo radiação. Isso nos transforma em pequenas fontes de radiação (OKUNO,2018).

A exposição à radiação natural é inevitável e representa uma parte significativa da dose anual de radiação recebida por qualquer indivíduo. Grande parte da exposição externa na qual estamos submetidos diariamente, se deve ao fato da incidência de raios cósmicos e à radiação oriunda de radionuclídeos naturais. O intervalo típico internacional de dose efetiva que resulta da exposição à radiação cósmica é de 0,3 mSv/ano a 1,0 mSv/ano, sendo a média 0,39 mSv/ano, e o da exposição à radiação terrestre externa, 0,3 mSv/ano a 1,0 mSv/ano, entretanto com média de 0,48 mSv/ano. A dose média anual global de radiação natural é de aproximadamente 2,4 mSv.ano<sup>-1</sup>, embora este valor possa variar dependendo de fatores geográficos e de estilo de vida (UNSCEAR,2000). A tabela



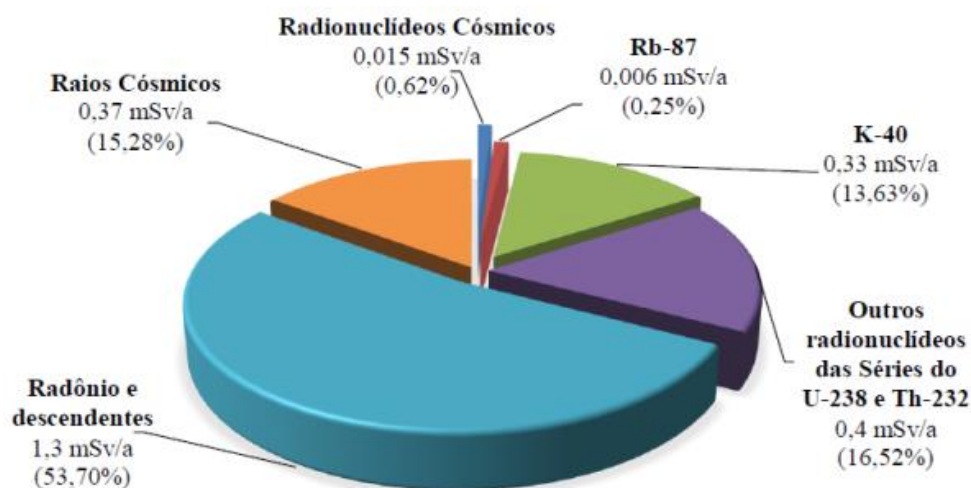
1 ilustra a média global da dose efetiva anual para adultos, devida à radiação proveniente de fontes naturais.

**Tabela 1:** Média global da dose efetiva anual para adultos devido a fontes naturais de radiação ionizante (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                     |
| <b>Total</b>  | <b>2,42</b>              |

A principal fonte de exposição externa à radiação gama para os seres humanos provém dos radionuclídeos naturais, como o  $^{40}\text{K}$ , dos radionuclídeos das séries radioativas naturais do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , e seus produtos de decaimento. Outra série natural importante é a do Actínio. A exposição a esses radionuclídeos está intimamente ligada à radioatividade do ambiente, que é predominantemente causada pela radiação gama. Os níveis dessa radiação gama variam de acordo com as condições geológicas de caráter específicos relativa a cada região do planeta e a concentração de urânio, tório e potássio nas rochas que constituem o solo (TZORTZIS; TSERTOS, 2004; ANJOS et al, 2005).

A incorporação desses radionuclídeos no organismo se dá por meio da ingestão de alimentos, pela água, através das vias respiratórias pelo ar inalado, também depende dos hábitos alimentares, além da estrutura de solo onde esses alimentos são plantados e das práticas agrícolas. Os radioisótopos comportam-se da mesma forma que seus isótopos não radioativos com relação à absorção pelas raízes das plantas, e mesmo não tendo função metabólica podem estar presentes nos tecidos vegetais (EISENBUD, 1987). Internamente, além da radiação gama, o corpo é também irradiado por partículas alfa e beta, que são geradas durante o processo de decaimento desses elementos (UNSCEAR, 2000). A figura 5 apresenta a dose anual recebida e seus respectivos percentuais de acordo com as fontes mais relevantes.



**Figura 5:** Dose anual recebida e seus respectivos percentuais de acordo com as fontes mais relevantes. Fonte: UNSCEAR, 2000 (Adaptado)

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA,2000), os isótopos de rádio, principalmente  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ , são classificados como agentes carcinogênicos devido à sua alta radiotoxicidade. Pesquisas sobre a radiotoxicidade de  $^{226}\text{Ra}$  são de grande interesse, não só pela importância radioepidemiológica, mas também por sua grande biodisponibilidade no ambiente (MILLS,1994). A radiotoxicidade do  $^{226}\text{Ra}$  resulta na deposição e fixação desse radionuclídeo nos ossos, devido à similaridade química e fisiológica ao cálcio, da meia- vida física e biológica longas e da emissão de partícula alfa durante o processo de decaimento (IYENGAR,1990). As emissões alfa podem ser acompanhadas por radiação gama, tanto para o radioisótopo  $^{226}\text{Ra}$  como para o  $^{228}\text{Ra}$ , a qual pode causar danos a nível celular e aumentar o risco de desenvolvimento de câncer (SPENCER).

A concentração de atividades dos radionuclídeos presentes no solo depende do tipo de rocha que o originou. Rochas de composição basáltica ou ultramáfica possuem concentrações de urânio inferiores a 1 mg/kg. Normalmente, níveis elevados de radiação estão associados a rochas ígneas, enquanto rochas sedimentares tendem a apresentar níveis mais baixos. Contudo, certos xistos e rochas fosfáticas podem conter altos níveis de radionuclídeos naturais (UNSCEAR, 2000 apud TZORTZIS; TSERTOS, 2004). Os valores médios encontrados nos solos são  $33 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ,  $32 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e  $45 \text{ Bq.kg}^{-1}$  para  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{232}\text{Th}$ , respectivamente (UNSCEAR,2008).

## **2.7. Radioatividade Artificial**

Irène Curie (1897-1956) e Jean Frédéric Joliot-Curie (1900-1958) em seus estudos sobre a transmutação artificial, no ano de 1934, descobriram que o bombardeio de partículas alfa ( $\alpha$ ) sobre os núcleos de elementos químicos leves podem originar elementos radioativos. Além disso, foi descoberto, que reações nucleares induzidas por prótons, dêuterons, nêutrons e fótons também podem resultar em produtos radioativos. A partir disso, a física nuclear estabeleceu o início de uma nova era de pesquisas. A investigação da radioatividade em núcleos atômicos criados artificialmente tem contribuído de modo significativo para a compreensão da constituição e da estabilidade dos núcleos. Estes nuclídeos decaem espontaneamente seguindo as mesmas leis que regem a desintegração dos elementos radioativos presentes na natureza. O termo radioatividade artificial refere-se ao método como são criados os novos nuclídeos e não pelo processo no qual eles decaem (KAPLAN, 1978). Os radionuclídeos artificiais, assim como os naturais são caracterizados pela sua respectiva meia-vida e pela radiação que emitem.

## **2.8. Radionuclídeos e Séries Radioativas**

A maioria das espécies atômicas presentes na natureza passa por desintegração nuclear espontânea, emitindo uma ou mais partículas subatômicas ou radiação eletromagnética como visto anteriormente. Essas espécies de nuclídeos instáveis ou radioativos, conhecidos como radionuclídeos, são abundantemente encontradas na natureza e também podem ser produzidas artificialmente, seja como subproduto do uso de combustível nuclear ou por meio de aceleradores de partículas. Existem diversos tipos de decaimento radioativo. Entretanto, neste trabalho, são discutidos especificamente aqueles que resultam na emissão de radiação gama, que é liberada pelo núcleo atômico em um estado excitado de energia, conhecido também como metaestável ou logo após a desintegração do núcleo com a emissão de uma partícula subatômica (KNOLL, 2010).

Os radionuclídeos naturais encontrados na Terra têm duas origens principais: (1) os remanescentes, que são resquícios dos radionuclídeos primordiais formados durante a síntese estelar e que ainda existem devido à sua longa meia-vida, superando o tempo decorrido desde sua formação; (2) a produção contínua de radionuclídeos causada pela interação dos raios cósmicos com a Terra, que ocorre desde sua formação. Esses raios cósmicos, compostos principalmente por nêutrons, prótons e partículas alfa, provêm tanto

do sol quanto de fontes distantes e interagem com os núcleos. Em particular, algumas dessas partículas colidem com os núcleos da atmosfera, gerando constantemente radionuclídeos leves. Esses radionuclídeos podem, por sua vez, decair e emitir nêutrons secundários, que podem ser absorvidos por outros núcleos, tornando-os radioativos (MIZRAHI,2016).

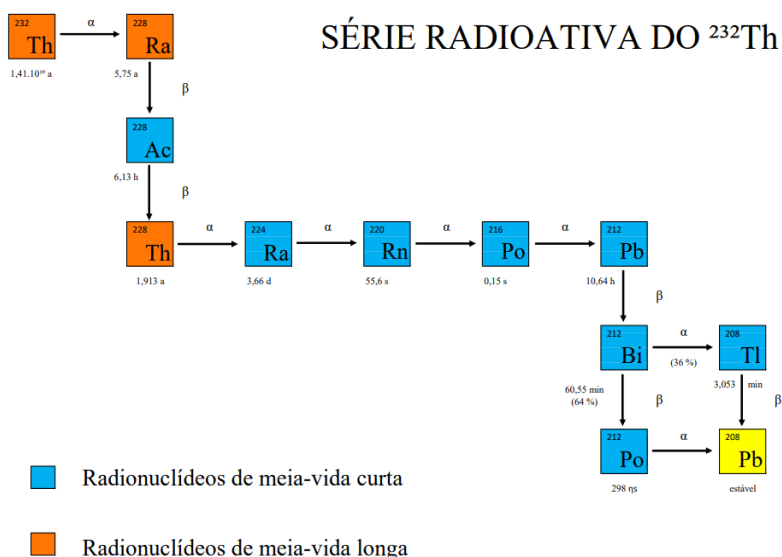
Na busca contínua pelo equilíbrio nuclear, o  $^{238}\text{U}$  emite radiação alfa e se transforma em  $^{234}\text{Th}$ . Este, sendo radioativo, emite radiações beta e se transforma em  $^{234}\text{Pa}$  radioativo, que por sua vez decai em  $^{234}\text{U}$ . Esse processo de transformação continua por várias etapas, resultando em núcleos cada vez mais estáveis. Cada núcleo novo é melhor organizado que o anterior, mas ainda pode apresentar imperfeições que precisam ser corrigidas por emissões de radiação. Isso forma uma cadeia de elementos radioativos que começa com o  $^{238}\text{U}$  e termina com o  $^{206}\text{Pb}$ , um isótopo estável. O mesmo tipo de processo ocorre com o  $^{232}\text{Th}$ , que se transforma em  $^{208}\text{Pb}$  (TAUHATA,2014).

Quando uma série de decaimentos radioativos acontece até que um isótopo estável seja alcançado, forma-se uma cadeia radioativa, que pode ser de origem natural ou artificial. Na natureza, quase todos os elementos radioativos encontrados fazem parte essencialmente de três cadeias principais: a série do Urânio, a do Actínio e a do Tório (GARCÊZ, 2016).

### **2.8.1. Séries Radioativas $^{238}\text{U}$**

A série do Urânio começa com o  $^{238}\text{U}$ , um dos elementos primordiais, que possui uma abundância isotópica de 99,27% e uma meia-vida de 4,47 bilhões de anos. Esta é a cadeia radioativa natural mais longa conhecida. O urânio está presente na maioria das rochas e solos, e sua concentração em rochas fosfáticas pode atingir até 120 ppm, com atividades específicas em torno de  $33 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Essa concentração relativamente elevada é devida as altas concentrações observadas nos fertilizantes fosfatados comerciais (EISENBUD, 1987). A exposição interna ao urânio acontece quando uma pessoa ingere alimentos ou água contaminados, ou inala partículas no ar. O urânio absorvido tende a se acumular nos rins e pode causar efeitos adversos à saúde, dependendo de sua interação com o corpo. A figura 6 traz o decaimento radioativo da série do  $^{238}\text{U}$ .





**Figura 7:** Decaimento Radioativo da Série do  $^{232}\text{Th}$  (TAUHATA,2014) (Adaptado).

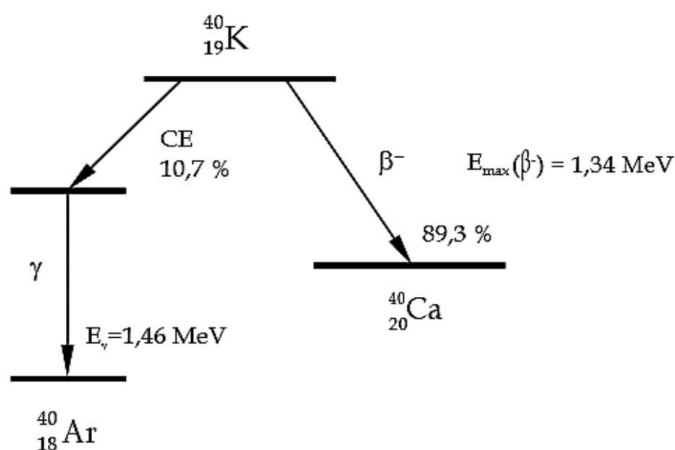
### 2.8.3. Elemento $^{40}\text{K}$

O  $^{40}\text{K}$  é um isótopo instável de ocorrência natural e pode ser verificado em todas as amostras ambientais. Tem uma meia-vida muito longa de 1,251 bilhões de anos, ou seja, é um isótopo pertencente aos nuclídeos primordiais com abundância natural de 0,012%. É o sétimo elemento mais comum no solo, e a concentração média devido ao potássio 40 é de 850 (Bq/kg) (GARCÊZ, 2016).

No corpo humano o  $^{40}\text{K}$  apresenta um comportamento semelhante ao potássio estável, sendo distribuído de modo uniforme nos tecidos musculares e sua concentração mantém-se constante devido ao equilíbrio homeostático. O corpo de um ser humano de 70 kg (homem padrão caucasiano) contém aproximadamente 140 g de potássio, consequentemente a atividade de  $^{40}\text{K}$  correspondente é de  $3,7 \times 10^3$  Bq. Este isótopo é responsável por equivalente de dose anual no corpo humano de 0,17 mSv para adultos e de 0,19 mSv para crianças, sendo que a maior contribuição da dose é devida à partícula  $\beta^-$  ao invés da radiação gama emitida (UNSCEAR, 2000).

O potássio 40 ( $^{40}_{19}\text{K}$ ) decai para o cálcio 40 ( $^{40}_{20}\text{Ca}$ ) via decaimento  $\beta^-$  em 89,3% das vezes, emitindo um elétron cuja energia máxima é de 1,34 MeV. Também há uma pequena possibilidade (0,001%) de decair por decaimento  $\beta^+$  emitindo um pósitron cuja

energia máxima é de 1,51 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 1460,82 keV (Figura) (LOPES, 2018). A figura 8 traz o esquema de decaimento do  $^{40}\text{K}$ .



**Figura 8:** Esquema de Decaimento do  $^{40}\text{K}$  (LOPES, 2018).

#### 2.8.4. Elemento $^{226}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Ra}$

O  $^{226}\text{Ra}$  e o  $^{228}\text{Ra}$  são radionuclídeos naturais originados das cadeias de decaimento do urânio e do tório. Devido à sua mobilidade, representam uma preocupação ambiental significativa.

Quando humanos ingerem rádio, cerca de 20% é absorvido pela circulação (MALETSKOS et al., 1966). O rádio é inicialmente distribuído aos tecidos moles e ossos, mas se acumula preferencialmente no osso em crescimento. Processos normais de remodelação óssea liberam rádio, com uma meia-vida biológica estimada de 10 anos (WRENN et al., 1985). A excreção ocorre principalmente através das fezes (MALETSKOS et al., 1966).

Na tabela 2 percebe-se a comparação entre a meia-vida física e a biológica (a qual nos fornece o tempo de retenção do radionuclídeo no organismo) para os radionuclídeos de interesse (SILVA, 2017).

**Tabela 2:** Dados Biocinéticos dos Radionuclídeos de Interesse.

| Nuclídeo          | Meia - vida física        | Meia - vida efetiva   | Fonte      |
|-------------------|---------------------------|---|------------|
| <sup>40</sup> K   | 1,28.10 <sup>9</sup> anos | 30 dias   | ICRP, 1978 |
| <sup>226</sup> Ra | 1,60.10 <sup>3</sup> anos | No sangue: 29% - 5 dias<br>11% - 60 dias<br>4% - 700 dias<br>2% - 5000 dias<br>54% - excretado prontamente<br>No tecido ósseo: 16000 dias | ICRP, 1989 |

## 2.9. Plantas Medicinais e Ornamentais

As plantas medicinais desempenham uma importância fundamental na história e na cultura do Brasil, refletindo uma rica tradição de uso terapêutico que remonta aos povos indígenas e se estende até os dias atuais. Desde tempos ancestrais, as comunidades indígenas brasileiras utilizam plantas para tratar doenças em rituais de cura e práticas passadas de geração em geração. O conhecimento sobre as propriedades curativas das plantas era transmitido pelo pajé, como líder espiritual e curandeiro, tinha o papel de aplicar esse conhecimento, utilizando espécies vegetais em rituais e tratamentos. Com a chegada dos colonizadores europeus, houve uma integração entre os saberes, combinando saberes indígenas, africanos e os conhecimentos botânicos trazidos pelos europeus, enriquecendo e desenvolvendo a tradição fitoterapia no país.

Associado a isso há de se considerar ainda as dimensões continentais do país com suas peculiaridades edafoclimáticas, características de cada região, bioma e unidade de paisagem. Dessa forma há necessidade de se conhecer a grande diversidade de plantas medicinais, muitas das quais ainda nem descobertas. Nesse sentido, grande contribuição tem sido obtida, ao longo das décadas, por meio do resgate do conhecimento popular. Os



estudos etnobotânicos e etnofarmacêuticos têm trazido à luz muitas informações importantes (CARVALHO, COSTA, CARNELOSSI, 2010).

Ao longo dos séculos, as plantas foram a única fonte de substâncias terapêuticas utilizadas pelo ser humano. No início do século XIX, com os avanços da química farmacêutica, as plantas desempenharam um papel essencial como base para o desenvolvimento de medicamentos. Mesmo com o desenvolvimento da síntese orgânica e o surgimento de novos processos biotecnológicos, atualmente cerca de 25% dos medicamentos prescritos em países industrializados ainda são derivados de plantas. Além disso, aproximadamente 120 compostos naturais, extraídos de cerca de 90 espécies vegetais, são empregados na terapia moderna (HOSTETTMANN et al., 2003).

Aproximadamente 75% da população mundial faz uso de plantas medicinais para tratar diversas doenças, devido a atributos desejáveis associados ao uso, como eficácia, segurança, qualidade consistente e reprodutibilidade. Essas plantas apresentam excelentes resultados na atenção primária à saúde, com resultados muito positivos em países da América Latina, Europa e principalmente na Ásia. Esse uso eficiente está relacionado à presença de compostos bioativos, como taninos, alcaloides, compostos fenólicos, óleos essenciais e vitaminas (KOSEKI et al., 2002).

Com o aumento significativo na demanda por produtos à base de plantas medicinais, torna-se essencial analisar como esses itens estão sendo disponibilizados aos consumidores, obedecendo a legislação específica e padrões definidos cientificamente. Diversas pesquisas têm comprovado a eficácia terapêutica de diversas espécies vegetais (FENNELL et al., 2004).

A biodiversidade brasileira é uma das mais ricas do mundo, abrigando uma vasta gama de espécies vegetais com potencial terapêutico. Essa diversidade oferece oportunidades únicas para a pesquisa e o desenvolvimento de novos fitoterápicos e medicamentos. No entanto, apesar do número significativo de estudos científicos sobre plantas medicinais no Brasil, o desenvolvimento de medicamentos a partir dessas plantas ainda é limitado. Isso destaca a necessidade de políticas públicas que incentivem a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação na produção de fitoterápicos, aproveitando o vasto conhecimento tradicional e a riqueza natural do país. Entretanto, o principal problema associado à prática do extrativismo é o risco de extinção das espécies coletadas

(REIS; MARIOT, 1999; MARTINS et al., 2001), então surge como alternativa a domesticação de espécies de plantas medicinais a serem cultivadas.

Algumas espécies de uso medicinal estão relatadas como espécies ameaçadas em livros e listas de espécies raras ou ameaçadas publicados no Brasil (Klein, R., 1996), em geral, a qualidade das informações oficiais relacionadas com o comércio das espécies é insuficiente para determinar a dimensão real desta atividade e seu impacto sobre os recursos utilizados. Várias espécies são usadas, comercializadas e registradas somente com o nome popular ou comum, ou com o nome científico incorreto. Desta forma, nem todas as plantas utilizadas e comercializadas são necessariamente aquelas assinaladas nos reportes oficiais (SILVA, BUITRÓN, OLIVEIRA, MARTINS, 2015).

Entretanto, Atualmente, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) tem se dedicado à análise dos processos de registro de medicamentos fitoterápicos, realizando as exigências previstas na legislação vigente. Observe também um esforço crescente por parte das indústrias para atender a esses requisitos e obter a concessão do registro, visando o comércio de seus produtos.

A floricultura é, de maneira ampla, uma atividade voltada para a produção comercial de flores e plantas ornamentais. Esse tipo de produção, caracterizado como horticultura intensiva, requer trabalhadores especializados e é realizado em áreas compactas, mas criteriosamente selecionadas e tecnologicamente avançadas. Atualmente, a termo agrofloricultura é empregada para representar todos os setores envolvidos na cadeia produtiva de flores e de plantas ornamentais (PETRY, BELLÉ, 2008). Plantas ornamentais são aquelas cultivadas principalmente por sua estética, valorizadas pela beleza de suas flores, folhagens, formas, núcleos ou aromas. Elas são amplamente utilizadas em paisagismo, jardinagem e na decoração de ambientes internos e externos.

O cultivo de plantas ornamentais pode ocorrer tanto em ambientes protegidos, como estufas ou telados, quanto a céu aberto. Dada a diversidade de microclimas presentes no Brasil e a ampla extensão da floricultura, é viável a produção dessas plantas ornamentais em todas as regiões do país, desde que sejam escolhidas espécies mais adaptadas a cada local. Essa estratégia permite a redução de custos e a exploração do potencial local e das características das espécies (PETRY, BELLÉ, 2008).

O produtor de plantas ornamentais deve ter como objetivo principal obter exemplares de alta qualidade, capazes de atender às demandas do consumidor. A partir da escolha da espécie a ser cultivada e da estrutura mais adequada, cada etapa subsequente desempenha um papel crucial na qualidade do produto final. Esse processo tem início na fase de propagação, com o emprego das técnicas mais adequadas e do uso de plantas matrizes com características ideais (GROLI, 2008).

As plantas ornamentais podem ser propagadas de duas formas distintas: por via sexuada, utilizando sementes ou esporos (como nas samambaias e avencas), e por via vegetativa ou assexuada, através de diferentes tipos de estruturas vegetativas. A definição do método a ser adotado não se baseia apenas na preferência do produtor, mas também envolve fatores essenciais, como as características específicas de cada espécie, além da disponibilidade de mão de obra e recursos (GROLI, 2008).

As plantas, assim como todos os seres vivos, precisam de nutrientes para seu crescimento e desenvolvimento. Dentre os elementos essenciais, podemos citar três que são obtidos pelo ar e pela água (carbono, oxigênio e oxigênio), enquanto os demais são geralmente absorvidos pelas raízes na forma de sais minerais ou relacionados aos compostos orgânicos. Os elementos absorvidos em maiores quantidades são os “macronutrientes” primários: nitrogênio, fósforo e potássio. Também são necessárias grandes quantidades de cálcio, magnésio e enxofre. Por outro lado, os nutrientes exigidos em quantidades mínimas são chamados de “micronutrientes” (ferro, zinco, boro, manganês, cobre, molibdênio e cloro) (BELLÉ, 2008).

O potássio (K) estimula a formação de flores e frutos, dá maior resistência ao frio e às doenças e ajuda na formação de raízes e bulbos, apresenta muita mobilidade no interior da planta, além de desempenhar outras funções. Sob a falta do potássio, as folhas mais velhas ficam com as margens e pontas endurecidas, às vezes com cor ferrugem ou queimadas, havendo um reduzido desenvolvimento a planta torna-se mais suscetível ao ataque de doenças e pragas (BELLÉ, 2008).

A floricultura é uma atividade agrícola dinâmica, de grande impacto econômico, que se dedica ao cultivo de plantas ornamentais para corte ou vaso, cultivo de plantas envasadas, produção de sementes, de bulbos e de mudas de árvores de grande porte. Pelo fato de ser uma atividade competitiva e altamente rentável, há uma exigência constante de geração de conhecimentos técnicos e adoção de tecnologias adequadas de produção

(TOMBOLATO, COSTA, 1998; NAPOLEÃO, 2005). Também o mercado consumidor dos produtos gerados pela floricultura é bastante exigente em termos de padrão de qualidade. Portanto, o produto final possui um alto valor intrínseco (QUERALT ET AL., 1993; TOMBOLATO, COSTA, 1998).

Neste estudo, o hibisco (*Hibiscus sabdariffa*) da família Malvaceae foi classificado como uma planta ornamental, devido as estruturas botânicas que tínhamos disponíveis, no caso, caule e folha. Entretanto, o chá com a flor de hibisco apresenta propriedades medicinais. É conhecida principalmente pela sua característica de possuir flores grandes e coloridas. Vale ressaltar, que a espécie mais comum consumida é justamente (*Hibiscus sabdariffa*), cuja as flores são secas e usadas na preparação do chá. As propriedades farmacológicas atribuídas a flor de hibisco podemos destacar sua ação diurética, antioxidante, além de ajudar a combater os radicais livres, regula o açúcar no sangue, reduz a pressão arterial, fortalece o sistema imunológico, melhora o funcionamento do fígado e diminui o colesterol ruim (LDL) (MOURA,2025).

Contudo, é preciso ter atenção as contraindicações, no que tange as pessoas que possuem algum tipo de problema hepático ou renal, onde uma avaliação médica antes do consumo é indicada. Além disso, em casos de gravidez e amamentação, é recomendado não ingerir o chá.

## **2.10. Radionuclídeos em Plantas Medicinais e Ornamentais**

As plantas são os principais receptores da contaminação radioativa na cadeia alimentar, seguidas pela absorção de radionuclídeos da atmosfera. Em nível global, a introdução de elementos radioativos na biosfera ocorre principalmente por meio da deposição atmosférica sobre a superfície terrestre, um fenômeno conhecido como *fallout*. Assim, o transporte desses elementos no meio ambiente envolve uma via de transferência entre componentes essenciais, como vegetação, solo, água, biota, fungos e algas. A vegetação pode ser contaminada tanto de forma direta quanto indireta. A contaminação direta ocorre quando materiais radioativos da atmosfera são depositados sobre a superfície das plantas, enquanto a contaminação indireta resulta da absorção de radionuclídeos presentes no solo através do sistema radicular. Os animais, por sua vez, atuam como receptores secundários na cadeia alimentar ao se alimentarem de plantas ou de outros organismos contaminados. Tanto os vegetais quanto os produtos de origem

animal acabam sendo consumidos pelos seres humanos, tornando-se parte de sua alimentação (SILVA, 2020).

Condições climáticas, como índices pluviométricos e vento, podem contribuir para a deposição de radionuclídeos nos vegetais. Contudo, as estruturas do solo, bem como suas características físicas e químicas, desempenham um papel fundamental no que tange a presença desses elementos nas plantas, facilitando a migração dos radionuclídeos para além da zona radicular. A absorção de radionuclídeos pelos vegetais é um dos principais mecanismos de introdução desses elementos na cadeia alimentar, considerando que grande parte da alimentação humana é baseada em produtos de origem vegetal (LOPES, 2018).

Os principais fatores que influenciam a transferência de radionuclídeos do solo para as plantas, por meio do sistema radicular, incluem o teor de argila, o conteúdo de matéria orgânica, o potencial hidrogeniônico (pH) e a capacidade de troca de cátions. A interação entre essas propriedades do solo provoca variações na transferência, dependendo das condições específicas, tornando algumas generalizações inadequadas. Além disso, há outras vias pelas quais os radionuclídeos podem entrar na cadeia alimentar humana, e, conforme o tipo de radionuclídeo e o metabolismo do organismo, suas concentrações podem aumentar ou diminuir em relação aos primeiros estágios dessa cadeia (UNSCEAR, 2000).

A translocação refere-se ao transporte e distribuição de íons e moléculas no interior das plantas. O fator de translocação é determinado pela deposição de radionuclídeos na superfície das folhas e pela absorção desses elementos, que são redistribuídos por toda a planta, com maior relevância para as partes comestíveis. A extensão desse processo depende das características da espécie vegetal, das condições ambientais, das propriedades químicas do radionuclídeo e do estágio de desenvolvimento da planta. As variações nas características fisiológicas, estruturais e morfológicas das plantas influenciam consideravelmente a acumulação de radionuclídeos. As plantas que crescem em solos contaminados com radionuclídeos não conseguem impedir sua absorção, mas conseguem limitar a translocação desses elementos, o que resulta em diferentes níveis de concentração quando são acumulados. Quando há um aumento na concentração de um radionuclídeo na raiz da planta em comparação com a parte aérea, isso indica que a espécie possui maior resistência à absorção do radioisótopo. Isso ocorre

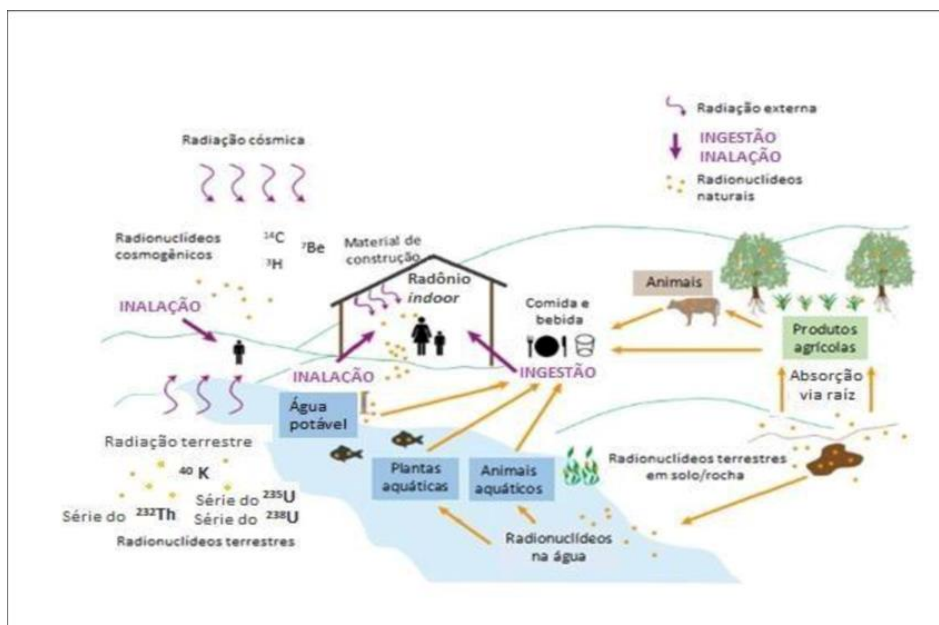
porque, quanto maior a resistência, maior será a quantidade do radioisótopo acumulado nas raízes (LOPES,2018).

Além da possibilidade de contaminação por radionuclídeos artificiais, que ocorre principalmente pela deposição de materiais radioativos da atmosfera sobre a superfície das plantas, resultando em contaminação direta, certas práticas agrícolas podem contribuir para o aumento da radioatividade no solo. Um exemplo disso é o uso excessivo de fertilizantes fosfatados, que podem elevar os níveis de radionuclídeos nos alimentos. Dependendo de sua origem, esses fertilizantes podem conter diversos elementos radioativos naturais, como  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ . Como os fertilizantes são amplamente utilizados em plantações, seu uso indiscriminado pode levar ao aumento da exposição à radiação nos alimentos, podendo, em alguns casos, ultrapassar o limite recomendado de 1 mSv por ano (SILVA,2020).

Entre os radioisótopos naturais que podem ser incorporados à dieta humana, o  $^{40}\text{K}$  merece destaque. O cálcio, o fósforo e o potássio estão entre os minerais mais abundantes no organismo, sendo o potássio essencial para o metabolismo e o funcionamento celular. Ele desempenha um papel fundamental na manutenção do equilíbrio dinâmico das membranas, é essencial para função muscular, além de participar da síntese de proteínas e auxiliar na condução dos impulsos nervosos. Dessa forma, toda matéria orgânica conterá, em algum nível, uma quantidade mínima de radioatividade.

O isótopo radioativo  $^{40}\text{K}$  é o principal responsável pela dose total de radiação natural interna, contribuindo com aproximadamente 60 a 70%. No organismo de um homem de referência caucasiano, com 70 kg, há cerca de 140 g de potássio distribuído por todos os órgãos. Deste total, cerca de 0,01652 g correspondem ao isótopo  $^{40}\text{K}$ , o que equivale a uma atividade de 3,7 kBq (UNSCEAR,2000).

O elemento Cs 137 é um isótopo artificial e no fallout de explosões nucleares ele é carregado pelo vento para a estratosfera e a troposfera, acumulando-se nos alimentos dos homens e animais, sendo 30% pelo leite; 25% grãos, 20% carne e 10% vegetais (FERREIRA, 2018). A figura 9 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 9:** Rotas dos radionuclídeos naturais no meio ambiente e exposição à externa e interna - (Modificado de European Atlas of Natural Radiation,2019).

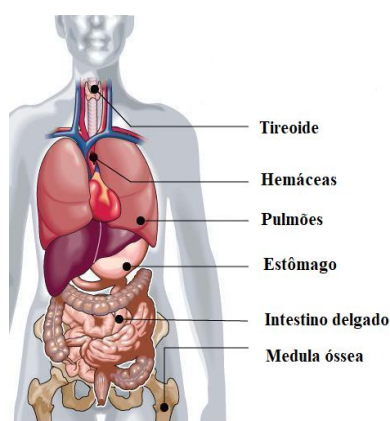
## 2.11. Efeitos Biológicos da Radiação no Corpo Humano

A exposição à radiação ionizante no corpo humano provoca alterações biológicas devido à sua capacidade de ionizar átomos e moléculas. Essas interações resultam em danos celulares que variam em intensidade e consequências, dependendo de fatores como o tipo de radiação, a dose absorvida, a taxa de exposição e a sensibilidade dos tecidos afetados.

Uma partícula ionizante, ao remover um elétron de um dos átomos de uma molécula do corpo, pode provocar sua desestabilização, resultando na quebra da molécula. Os efeitos biológicos das radiações ionizantes podem ser classificados quanto a seu mecanismo (direto ou indireto) e quanto à sua natureza (reações teciduais ou efeitos estocásticos) (OKUNO; YOSHIMURA,2010). A atuação da radiação no corpo humano segue uma sequência de quatro eventos.

No estágio físico, ocorre a ionização dos átomos que constituem a molécula e tem uma duração de aproximadamente  $10^{-15}\text{s}$ , é o início do dano biológico. Em seguida inicia-se o estágio físico – químico, momento que acontece as quebras das ligações químicas das moléculas que sofreram ionização e há formação de radicais livres. Este

segundo processo ocorre com uma duração de aproximadamente  $10^{-6}$ s. Em seguida inicia-se o estágio químico, momento que os fragmentos das moléculas se ligam a outras moléculas essenciais, como as proteínas ou enzimas e tem duração de poucos segundos. O último estágio é o biológico, que dura dias, semanas ou até anos, momento em que podem surgir efeitos bioquímicos ou fisiológicos, promovendo alterações morfológicas e funcionais dos órgãos (OKUNO,2010). A figura 10 traz alguns órgãos sensíveis a radiação ionizante.

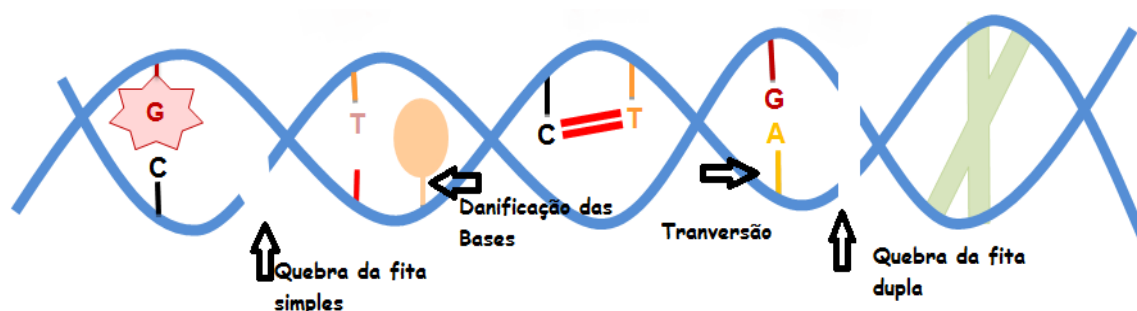


**Figura 10:** Órgãos sensíveis à radiação ionizante. Fonte: Graphic News.

A interação da radiação ionizante com o material biológico ocorre por meio de dois mecanismos capazes de causar danos. O primeiro é o mecanismo direto, no qual a radiação interage diretamente com componentes celulares como o ácido desoxirribonucleico (DNA), proteínas e lipídios, provocando alterações estruturais nessas moléculas. O segundo mecanismo, chamado indireto, é responsável por aproximadamente 70% dos efeitos biológicos da radiação. Nesse caso, a interação ocorre predominantemente com as moléculas de água, que constituem cerca de 65% em massa do corpo humano, sofrem radiólise, isto é, são quebradas. Alguns de seus subprodutos são radicais livres, que são extremamente radioativos e atacam outras moléculas importantes do corpo (OKUNO,2018). Além disso, as células podem apresentar respostas prejudiciais mesmo sem serem diretamente atingidas pela radiação ionizante, apenas por estarem próximas de células afetadas (PRISE, 2006). O efeito bystander refere-se aos danos que ocorrem em uma célula sem que tenham sido diretamente expostas à radiação,



mas apenas por estarem nas proximidades das células atingidas. Em experimentos observou-se que 30% de uma certa cultura de células apresentaram aberração cromossômica, isto quando irradiados por partículas alfa menos de 1% dos núcleos celulares (NAGASAWA E LITTLE 1992). A figura 11 apresenta os danos causados da radiação ao DNA.



**Figura 11:** Efeitos da radiação ionizante no DNA.

Fonte:<<https://1.bp.blogspot.com/uTScGsjEVRc/VIT1ENiiu3I/AAAAAAAAAJs/p04r0P3OOjw/s1600/dna%2Blesivo2.png>>

O alvo da radiação ionizante é a molécula de DNA para efeitos radiobiológicos. Entre os danos podemos destacar a quebra de pontes de hidrogênio, a mudança ou a perda de uma base, a quebra de uma das fitas ou de duas fitas e, em consequência, a formação de uma ligação cruzada. A quebra das pontes de hidrogênio pode ser reconstruída em questão de dezenas de minutos por enzimas específicas. Contudo, se um número muito grande de danos ocorrer simultaneamente, pode não haver tempo para que todos esses danos sejam corrigidos, o que pode levar à morte da célula ou mutações e até mesmo câncer (OKUNO,2018).

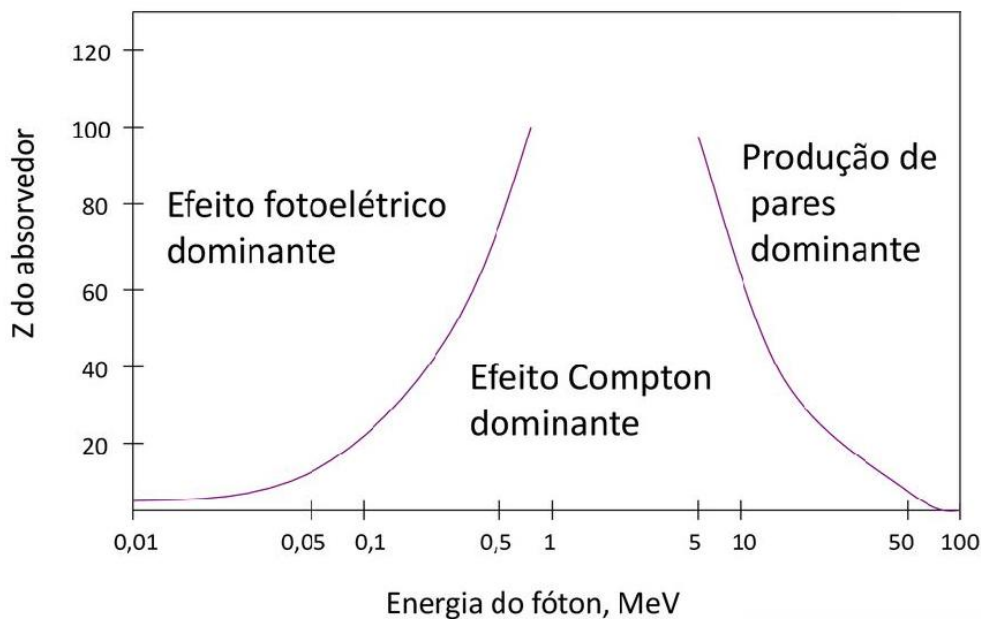
A exposição do organismo à radiação ionizante pode desencadear uma sequência de reações, que podem resultar em mutações de seu material genético ou até a morte do organismo. A maioria das quebras de duas fitas da molécula de DNA são reparadas em um período de 24h após a irradiação, mais em torno de 25% dos reparos são feitos de modo incorreto, sendo a principal causa de morte celular, além de apresentar efeitos mutagênicos e cancerígenos. Já a quebra de apenas uma fita, ou seja, quebra simples tem poucas consequências biológicas (OKUNO,2018).

O efeito estocástico é probabilístico, e sua ocorrência é proporcional à dose de radiação recebida, sem a existência de um limiar. Assim, para pequenas doses, ou seja, abaixo dos limites estabelecidos por normas ou recomendações de proteção radiológica, podem induzir tais efeitos. Os principais efeitos são o efeito cancerígeno, que surgem nas células normais e pela consequência da interação com a radiação ocorre mutações que por sua vez, reflete nas células somáticas e o efeito hereditário, quando a mutação ocorre nas células germinativas do indivíduo irradiado e o dano é transmitido para seus descendentes (TAUHATA,2014). O câncer é o que se destaca e a estimativa de ocorrência no Brasil, para o ano de 2025, é 704 mil casos (INCA,2025). Vale ressaltar que a radiação ionizante não é a única forma de desenvolver câncer.

Os efeitos determinísticos são causados por irradiação total ou localizada de um tecido, causando a morte celular não havendo reposição ou reparo, com prejuízos detectáveis no funcionamento do tecido ou órgão. Os efeitos determinísticos são produzidos por doses elevadas, acima do limiar, onde a severidade ou gravidade do dano aumenta com a dose aplicada. Para valores de dose abaixo do limiar, considera-se nula a probabilidade de ocorrência do efeito, entretanto, para valores acima a probabilidade é de 100% (TAUHATA,2014). Como consequências desse efeito podemos observar a esterilidade, catarata, eritema e descamação da pele, necrose dos tecidos, diminuição das células sanguíneas e retardo mental quando o embrião é irradiado (SILVA,2022).

## **2.12. Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria**

A forma como a radiação eletromagnética interage com a matéria depende essencialmente da energia proveniente dos fótons incidentes e da estrutura do material na qual interage. Uma questão fundamental no processo de detecção, passa pelo entendimento de como os raios gama ou radiação gama interage com o detector, quanto a transferência de energia, parcial ou total para o meio de detecção. No caso deste trabalho foi utilizado um detector de alta pureza HPGe. Os principais efeitos observados, dentro do espectro de energia dos radionuclídeos naturais e artificiais são os seguintes: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares. A figura 12 mostra o efeito mais representativo para cada faixa de energia.



**Figura 12:** Processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton e do número atômico do material. (TAUHATA,2014) (Adaptado).

### 2.12.1. Efeito Fotoelétrico

Foi em 1886 e 1887 que Heinrich Hertz realizou as experiências que pela primeira confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell sobre a propagação da luz. É um desses fatos paradoxais e fascinantes na história da ciência que Hertz tenha notado, no decorrer de suas experiências, o efeito que Einstein mais tarde usou para contradizer outros aspectos da teoria eletromagnética clássica (RESNICK, 1979).

No final do século XIX experimentos demonstraram que certos tipos de luz quando incide em determinadas superfícies metálicas provocavam a emissão de elétrons por essas superfícies. Esse fenômeno é conhecido como Efeito fotoelétrico.

Ao discorrer sobre os estudos do Efeito fotoelétrico, pode verificar evidências sobre a radiação, e sua natureza corpuscular quando interage com a matéria, assim como a natureza ondulatória quando propagada.

O efeito fotoelétrico é um fenômeno físico no qual um fóton incidente interage com um elétron ligado a eletrosfera de um átomo, resultando na transferência total de

energia do fóton para o elétron. A interação do fóton com o elétron leva à ejeção do elétron de sua órbita, desde que a energia do fóton incidente ( $h\nu$ ) seja maior que a energia de ligação ( $E_l$ ) desse elétron ao núcleo atômico. A energia cinética ( $K$ ) do elétron ejetado é dada pela diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação (equação 4).

$$K = h\nu - E_l \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$K$ : Energia cinética do elétron ejetado (J) ou (eV)

$E_l$ : Energia de ligação (J) ou (eV)

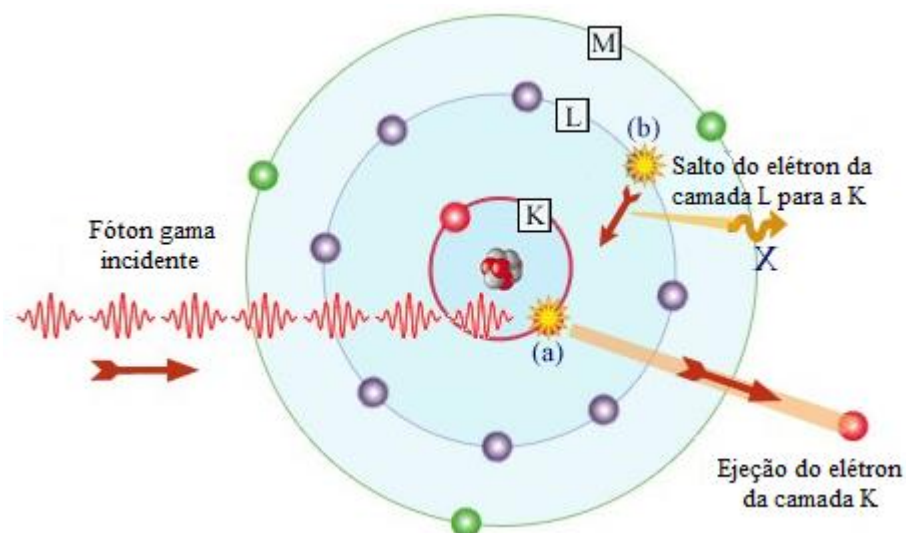
$h$ : Constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  J.s) ou ( $4,13 \cdot 10^{-15}$  eV.s)

$\nu$ : Frequência do fóton ( $s^{-1}$ )

Após a ejeção do elétron, cria-se uma vacância na camada eletrônica da qual o elétron foi removido, deixando o átomo em um estado excitado. Essa vacância pode ser preenchida por um elétron de uma camada mais externa, um processo que há liberação de energia. Essa energia pode ser dissipada de duas maneiras (PODGORSK, 2010):

- (1) Emissão de raio X característico: A energia liberada pela transição eletrônica entre camadas é emitida sob forma de radiação eletromagnética, produzindo raios X com energia específica do elemento, conhecidos como raios X característicos.
- (2) Emissão de elétron Auger: Em vez de ser liberada como radiação, a energia da transição pode ser transferida a outro elétron da eletrosfera, que é então ejetado do átomo como um elétron Auger, com energia cinética bem definida.

Esse fenômeno ocorre predominantemente com fótons de baixa energia ( $< 0,5$  MeV), na faixa de raios X ou radiação gama de baixa energia e é mais comum em materiais com número atômico elevado, onde a energia de ligação dos elétrons nas camadas internas é significativa. A figura 13 ilustra o efeito fotoelétrico.



**Figura 13:** Efeito Fotoelétrico. Fonte < [https://www.radiation-dosimetry.org/wp-content/uploads/2019/12/Photoelectric\\_effect\\_2.jpg](https://www.radiation-dosimetry.org/wp-content/uploads/2019/12/Photoelectric_effect_2.jpg)>

### 2.12.2. Efeito Compton

O espalhamento Compton é um processo físico de interação da radiação eletromagnética, no qual um fóton interage (colisão inelástica) com um elétron livre ou fracamente ligado do material absorvedor e transfere parte de sua energia, resultando em uma mudança no comprimento de onda do fóton espalhado e desviando sua trajetória original. Durante o espalhamento, o fóton incidente cede uma fração de sua energia ao elétron, resultando em um fóton espalhado com energia menor e comprimento de onda maior do que o fóton incidente e um elétron de recuo que é ejetado com uma determinada energia cinética, dependendo do ângulo de espalhamento.

A predominância do espalhamento Compton ocorre na faixa de < 0,5 a 5 MeV e depende da energia do fóton incidente. Esse fenômeno foi descrito por Arthur Compton em 1923 e é uma das principais interações da radiação gama e de raios X com a matéria (RESNICK,1979). O espalhamento Compton segue as leis da conservação da energia e do momento linear. A equação fundamental que descreve a variação no comprimento de onda do fóton devido ao espalhamento é dada por (equação 5):

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos \theta) \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$\lambda$ : Comprimento de onda do fóton antes do espalhamento (m)

$\lambda'$ : Comprimento de onda do fóton depois do espalhamento (m)

$h$ : É a constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  J.s) ou ( $4,13.10^{-15}$  eV.s)

$m_e$ : É a massa do elétron ( $9,109 \times 10^{-31}$  kg)

$c$ : É a velocidade da luz ( $3,0 \times 10^8$  m/s)

$\theta$ : É o ângulo de espalhamento do fóton

Quanto maior o ângulo de espalhamento ( $\theta$ ), maior será a variação no comprimento de onda, indicando uma maior perda de energia do fóton para o elétron. A energia do fóton espalhado ( $E_\gamma'$ ) (equação 6) depende da energia do fóton incidente ( $E_\gamma$ ) e do ângulo de espalhamento  $\theta$ , em relação à direção do fóton incidente, pode ser expressa como (TAUHATA,2014):

$$E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (\text{equação 6})$$

$$\alpha = \frac{E_\gamma}{m_e \cdot c^2} \quad (\text{equação 7})$$

Onde,  $m_e \cdot c^2 = 511 \text{ keV}$  corresponde à energia de repouso do elétron. A energia do fóton espalhado é máxima para  $\theta = 0^\circ$  e mínima para  $\theta = 180^\circ$ . A equação 8 descreve a energia cinética máxima do elétron ejetado. A figura 14 representa o efeito ou espalhamento Compton.

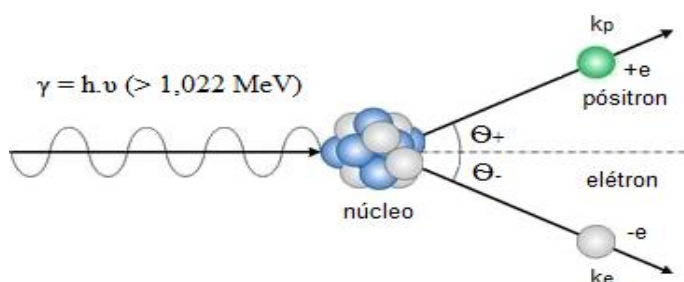
$$K_e = K_{\text{máx}} = E_\gamma \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha} \quad (\text{equação 8})$$



**Figura 14:** Efeito ou Espalhamento Compton. Fonte < <https://pt-static.z-dn.net/files/d45/dbd4fd70478ab55e405a6265793405d7.png> >

### 2.12.3. Produção de Pares

Uma das formas predominantes de absorção da radiação é quando fótons com energia superior a 1.022 MeV se aproximam de núcleos com elevado número atômico, onde esses fótons interagem com o intenso campo elétrico gerado pelo núcleo (campo Coulombiano). Durante essa interação, a radiação é completamente absorvida, resultando na formação de um par elétron – pósitron ( $2m_e c^2$ ) (TAUHATA,2014) com energias cinéticas não necessariamente iguais. Tais energias são calculadas pela diferença entre a energia do fóton incidente ( $h\nu$ ) e a energia mínima (limiar) necessária para a ocorrência deste efeito que é equivalente ao dobro da massa de repouso do elétron (igual a 1,022 MeV). A figura 15 representa a formação do par elétron- pósitron após a interação da radiação com o núcleo.



**Figura 15:** Ilustração da produção de um par elétron-pósitron. Fonte: ResearchGate (Adaptado)

A expressão abaixo representa a reação de formação do par elétron – pósitron e o respectivo balanço energético:

$$\gamma \rightarrow e^{-} + e^{+} + k_p + k_e$$

Onde:

Energia do fóton incidente:  $\gamma = h \cdot \nu$

Elétron:  $e^{-}$

Pósitron:  $e^{+}$

Energia cinética elétron:  $k_e$

Energia cinética pósitron:  $k_p$

### 2.13. Radiação Ionizante

Quando a radiação tem energia suficiente para remover um dos elétrons orbitais de átomos de um dado meio, transformando-os em pares de íons, ela é chamada de radiação ionizante. A ionização ocorre quando um elétron é retirado direta ou indiretamente de um átomo, convertendo-o em um íon positivo. Durante a interação com os átomos do meio, partículas carregadas e energéticas causam ionização diretamente, ejetando elétrons dos átomos em seu caminho, perdendo energia gradativamente em várias interações até pararem. De outro modo, partículas neutras e ondas eletromagnéticas energéticas perdem toda ou quase toda a sua energia em uma única interação. A partícula carregada gerada nessas interações é responsável por ionizar os átomos em seu percurso, depositando sua energia no meio. No caso da radiação indiretamente ionizante, a ionização ocorre em duas etapas (OKUNO,2018).

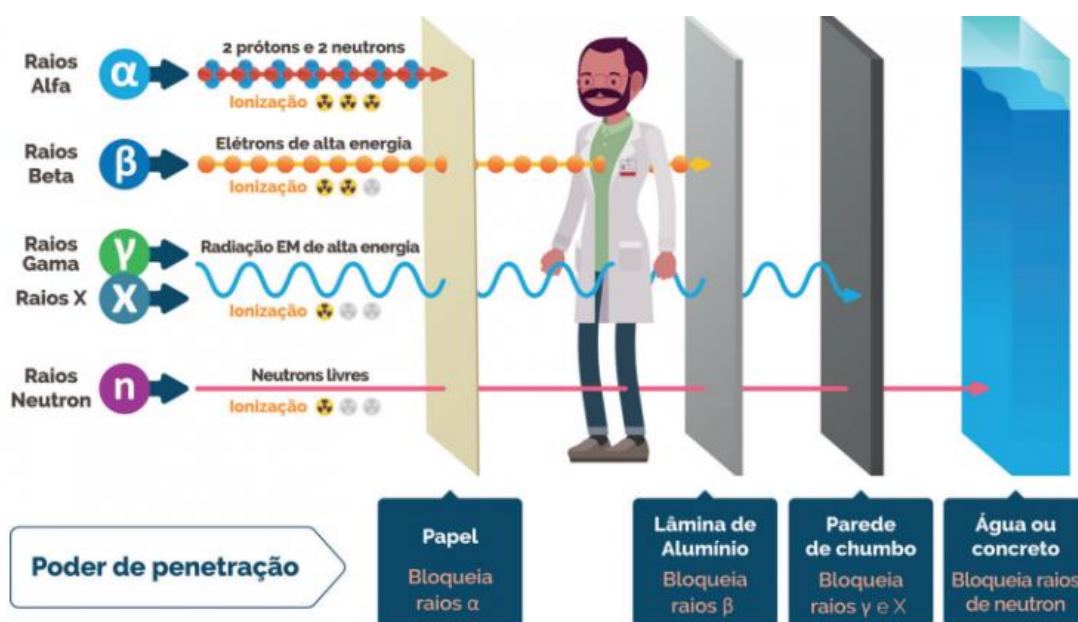
A energia de ligação de um elétron a um átomo depende de átomo para átomo. Assim, uma radiação pode ser ionizante em um meio, mas não em outro. Como a radiação ultravioleta possui baixa profundidade de penetração no corpo humano, os principais órgãos que precisam ser protegidos são a pele e os olhos. A Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP, 2004) define como radiação ionizante qualquer onda eletromagnética com comprimento de onda inferior a 100 nm, o que



corresponde a fótons com energia superior a 12 eV, como os raios X e raios gama (OKUNO,2018).

## 2.14. Decaimento Nuclear

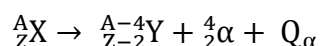
O decaimento dos núcleos instáveis, ocorre a partir da emissão de radiação ionizante e pode apresentar-se de maneiras diferentes, através de partículas ou radiação eletromagnética. Dentre elas partícula alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), radiação gama ( $\gamma$ ) e nêutrons (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). Elementos químicos com número atômico maiores que  $Z= 83$ , apresentam essa característica. No decaimento  $\alpha$ , a emissão espontânea de uma partícula  $\alpha$  por um núcleo de número atômico elevado. Outro tipo de decaimento é o  $\beta$ , onde ocorre a emissão ou absorção espontânea de um elétron ou pósitron por um núcleo. Este modo de desexcitação do núcleo é particularmente interessante porque ele nos informa sobre a interação decaimento  $\beta$ , que é uma das quatro interações (ou forças) fundamentais da natureza. Já o decaimento  $\gamma$ , ocorre a emissão espontânea de fótons de alta energia pelo núcleo por ocasião de uma transição entre um estado excitado para um estado de energia inferior. Este tipo de decaimento fornece informações detalhadas sobre os estados excitados dos núcleos (RESNICK, 1979). A figura 16 mostra o poder de penetração de diferentes radiações ionizantes.



**Figura 16:** Poder de penetração de diferentes radiações ionizantes. Fonte: Conselho Regional de Farmácia de São Paulo.

### 2.14.1. Radiação Alfa ( $\alpha$ )

A desintegração alfa é um tipo de decaimento radioativo em que um núcleo instável emite uma partícula alfa ( $\alpha$ ), que consiste em dois prótons e dois nêutrons, sendo equivalente a um núcleo de hélio- 4 ( ${}^4\text{He}$ ). Isso se deve ao fato de que esses núcleos possuem um excesso de prótons e nêutrons, tornando-se instáveis devido à repulsão coulombiana entre os prótons. A massa do núcleo radioativo original é maior do que a soma das massas dos produtos de decaimento. A expressão, traz o decaimento alfa ( $\alpha$ ).

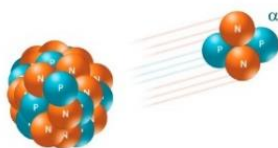


Onde:

${}^A_Z\text{X}$ : Núcleo pai (instável)

${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ : Núcleo filho (mais estável)

$\alpha$ : Partícula alfa ( ${}^4\text{He}$ )



Para que a emissão alfa ocorra, a energia de ligação do núcleo deve permitir que um aglomerado de dois prótons e dois nêutrons escape da barreira nuclear. Essa energia é determinada pela equação 9 de energia de decaimento:

$$Q_\alpha = [m(\text{X}) - m(\text{Y}) - m(\alpha)] \cdot c^2 \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

$Q_\alpha$ : É a energia liberada no decaimento (em MeV)

$m(\text{X})$ : É a massa do núcleo pai

$m(\text{Y})$ : É a massa do núcleo filho

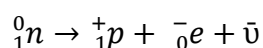
$m(\alpha)$ : É a massa da partícula alfa

$c$ : É a velocidade da luz

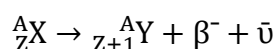
### 2.14.2. Radiação Beta ( $\beta$ )

Radiação beta ( $\beta$ ) é o termo usado para descrever elétrons de origem nuclear, carregados positiva ( $\beta^+$ ) pósitrons ou negativamente ( $\beta^-$ ) negatrons, acompanhada por um neutrino ou anti-neutrino. Sua emissão constitui um processo comum em núcleos de massa pequena ou intermediária, que possuem excesso de prótons ou de nêutrons em relação à estrutura estável correspondente (TAUHATA,2014).

Quando um núcleo possui um excesso de nêutrons e uma quantidade insuficiente de prótons, ocorre um processo de ajuste no qual um nêutron se transforma em um próton, resultando na emissão de um elétron durante o decaimento. A transformação do nêutron em um próton pelo processo da emissão  $\beta^-$  pode ser representada por:

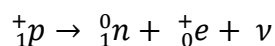


Nesse caso, o núcleo inicial transforma-se de configuração, resultando em um novo núcleo com carga superior de uma unidade em relação ao núcleo inicial emitindo também um elétron e um anti-neutrino. A expressão (..) traz o decaimento  $\beta^-$ .

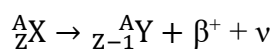


A energia cinética resultante da diferença de energia entre o estado inicial do núcleo  ${}^A_ZX$  e o estado do núcleo resultante  ${}^A_{Z+1}Y$  é distribuída entre o elétron e o anti-neutrino. Após o processo pode haver ainda excesso de energia, que é emitido na forma de radiação gama (TAUHATA,2014).

A radiação do tipo  $\beta^+$  resulta da conversão de um próton em um nêutron e pode ser representada por:



Para que ocorra uma desintegração  $\beta^+$ , é necessária uma energia mínima de 1,02 MeV, onde  $m_e.c^2 = 0,511$  MeV (massa de repouso do elétron equivalente em energia). Desde que o núcleo filho tenha o número de carga igual ao do pai menos um, o átomo produto deve perder um elétron orbital, imediatamente após a transição nuclear ocorrer.



O pósitron interage com a matéria de maneira semelhante ao elétron negativo. Após transferir sua energia cinética excedente no meio material, ele captura um elétron

livre, originando um positrônio. Esse estado, em seguida, sofre aniquilação, produzindo duas radiações gama de 0,511 MeV cada, que são emitidas em direções opostas.

Nas transições beta, que abrangem a emissão  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  e captura eletrônica, ocorrem mudanças de um estado do núcleo pai para um ou mais estados do núcleo filho. Tais estados são caracterizados por seus parâmetros como: energia, momento angular total e paridade (TAUHATA,2014).



### 2.14.3. Radiação Gama ( $\gamma$ )

Quando um núcleo sofre decaimento por emissão de radiação alfa ou beta, o núcleo remanescente geralmente apresenta seus núcleons em estados excitados, fora da configuração de equilíbrio. Para alcançar o estado fundamental, esse núcleo libera a energia excedente na forma de radiação eletromagnética, conhecida como radiação gama (TAUHATA,2014). Esta radiação é a mais penetrante, comparada aos outros tipos de radiação, todavia por não possuir massa e carga elétrica. Quando penetra através da matéria, causa ionização nos átomos essencialmente devido às interações com os elétrons.

A energia da radiação gama é bem definida e corresponde à diferença entre os níveis de energia de transição proveniente do núcleo que se desexcita, podendo ocorrer a emissão de um ou mais raios gamas em cada desintegração. Esta transição pode ocorrer de formas diferentes, entre dois níveis excitados ou entre um nível excitado e o estado de mínima energia, ou seja, o nível fundamental. A equação 10 traduz quantitativamente a energia do fóton na forma de radiação eletromagnética (HALLIDAY,2009).

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

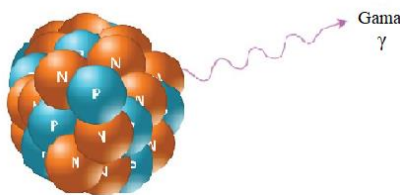
$E$  = Energia da radiação (J) ou (eV)

$h$  = Constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  J.s) ou ( $4,13 \cdot 10^{-15}$  eV.s)

$\nu$  = Frequência da radiação ( $s^{-1}$ )

$c$  = Velocidade da luz (m/s)

$\lambda$  = Comprimento de onda (m)

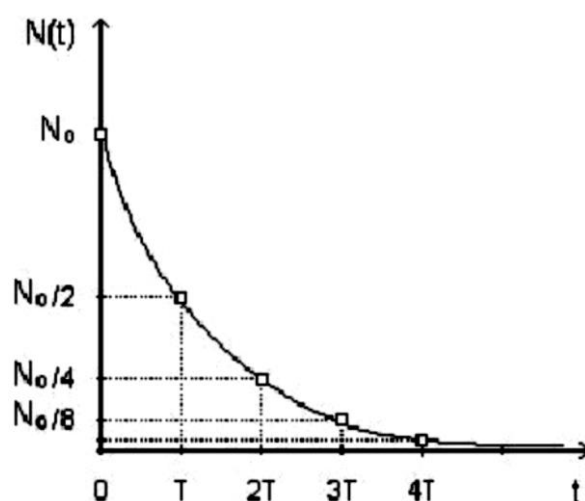


## 2.15. Lei do Decaimento Radioativo

Ernest Rutherford e Frederick Soddy publicaram um artigo de grande relevância, intitulado "The cause and nature of radioactivity" (Philosophical Magazine, V. 4, p. 370-396, 1902), no qual apresentam a lei fundamental do decaimento radioativo, estabelecida por meio de experimentos (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). Esta lei permite prever o número de núcleos de uma amostra radioativa que ainda não sofreram decaimento, e também o número de núcleos que já decaíram, dentro de um determinado intervalo de tempo, a equação 11 traz essa relação.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{equação 11})$$

Seja  $N_0$  o número de núcleos de uma amostra radioativa que ainda não decaiu, ou seja, que permanece em estado excitado, em um certo momento  $t = 0$ . O número de núcleos que decaem no intervalo de tempo entre  $t$  e  $t + \Delta t$  será proporcional a  $N(t)$  e a  $\Delta t$ , expresso pela equação  $-\Delta N(\Delta t) = \lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t$ . A constante de proporcionalidade  $\lambda$  representa a probabilidade de decaimento por unidade de tempo, que é característica de cada radionuclídeo. O sinal negativo em  $-\Delta N(\Delta t)$  indica a diminuição dos núcleos em relação ao número  $N(t)$  da amostra inicial. Essa equação sugere que, ao contar o número de núcleos  $N(t)$  em diferentes intervalos de tempo e representar isso graficamente, o resultado será uma curva previsível apresentado na figura 17. (SILVA, 2018).



**Figura 17:** Número  $N(t)$  de Núcleos que Ainda não Decaíram em Função do Tempo  $t$

Essa mesma lei foi posteriormente deduzida por Ergon Von Schweidler em 1905, com base em considerações estatísticas. Se o número de radionuclídeos presentes no tempo  $t$  for  $N$ , e assumirmos que cada partícula possui a mesma constante de probabilidade,  $\lambda$ , para decair por unidade de tempo, independentemente de sua idade, então o número  $dN$  de núcleos que decaem no intervalo de tempo  $dt$  é dado pela equação 12 (OKUNO; YOSHIMURA,2010):

$$dN = -\lambda \cdot N(t) \cdot dt \quad (\text{equação 12})$$

A taxa de desintegrações nucleares por unidade de tempo (Equação 13) é diretamente proporcional à quantidade de material radioativo presente na amostra, seja em termos de massa ou número de átomos. Representando isso de forma simbólica, temos:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t) \quad (\text{equação 13})$$

Integrando-se a equação 13 descrita acima se obtém uma expressão de  $N$  em função do tempo.

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot \int_0^t dt$$

$$\ln \left( \frac{N}{N_0} \right) = -\lambda \cdot t$$

Finalmente, fazendo as substituições devidas, obtém-se a equação 14:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{equação 14})$$

Onde:

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

A meia-vida física de um elemento ( $T_{\frac{1}{2}\text{fis}}$ ) é o tempo necessário para que a atividade de um elemento radioativo se reduza à metade de sua atividade inicial. A cada ciclo de meia-vida, a atividade radioativa diminui pela metade em relação ao valor anterior, até alcançar um nível tão baixo que suas radiações se tornam indistinguíveis das emitidas pelo ambiente. Esse fenômeno permite monitorar a duração ou a “vida” de um elemento radioativo, sendo conhecido como decaimento radioativo nuclear, ou simplesmente decaimento nuclear. Representando isso de forma simbólica, temos:

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

Substituindo-se estes valores na equação 14 obtém-se a meia vida física, equação 15:

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

$$T_{\frac{1}{2}\text{fis}} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (\text{equação 15})$$

A meia-vida física de um radionuclídeo, expressa em segundos, está diretamente relacionada aos possíveis efeitos nocivos da radiação. Já a meia-vida biológica refere-se ao tempo necessário para que metade da concentração de um elemento presente no organismo seja eliminada por processos físicos ou químicos. Um radionuclídeo com meia-vida da ordem de anos pode provocar impactos a longo prazo e se dispersar por diferentes compartimentos do ecossistema. No entanto, isso não significa que isótopos de meia-vida curta sejam inofensivos, já que uma quantidade comparável (N) de um isótopo de meia-vida curta pode emitir tanta radioatividade quanto outro isótopo de meia-vida longa, embora em um período mais curto. Essa liberação rápida pode ser especialmente crítica para determinados órgãos, já que a severidade dos efeitos

da radiação aumenta quando a dose é entregue em um intervalo de tempo reduzido (SILVA, 2018).

A quantidade de radionuclídeos no organismo humano diminui de forma exponencial ao longo do tempo. Isso acontece não apenas devido ao decaimento natural do radionuclídeo, mas também pela eliminação das substâncias através de processos de excreção. Nesse contexto, a meia-vida efetiva é o parâmetro que expressa o tempo necessário para que a concentração de um material radioativo no organismo seja reduzida à metade. 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 16 (SCHEIBEL, 2006).

$$\frac{1}{T_{\frac{1}{2}^{eff}}} = \frac{1}{T_{\frac{1}{2}^{fis}}} + \frac{1}{T_{\frac{1}{2}^{biol}}} \quad (\text{equação 16})$$

## 2.16. Atividade Específica

A taxa de desintegrações nucleares, ou atividade radioativa, é determinada pelo produto da constante de decaimento ( $\lambda$ ) e o número de átomos radioativos presentes (N) na amostra. A atividade pode ser expressa pela equação 13 (TAUHATA, 2014).

$$A(t) = \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t) \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

A(t): Atividade do elemento radioativo em um determinado tempo t (Bq)

$\lambda$ : Constante de desintegração (característica de cada radionuclídeo) ( $s^{-1}$ )

t : Tempo decorrido (s)

Integrando a equação diferencial e chamando de N(0) o número de átomos radioativos existentes na amostra no instante t= 0, temos a equação 14:

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{equação 14})$$



Já a atividade da amostra pode ser obtida pela equação 17:

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{equação 17})$$

A atividade da amostra no instante zero,  $A(0)$ , é expressa pela equação 18.

$$A(0) = \lambda \cdot N(0) \quad (\text{equação 18})$$

e, portanto, temos a equação 19 que expressa a atividade em um instante  $t$  relativo à sua atividade inicial  $t = 0$ .

$$A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{equação 19})$$

O número inicial de átomos radioativos  $N(0)$  em uma amostra de um determinado radionuclídeo específico é dado pela equação 20.

$$N(0) = \frac{m \cdot N_A}{A} \quad (\text{equação 20})$$

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 equação 21.

$$\frac{A(T)}{m} = \frac{N_A}{N(T)} = 0,693 \cdot \frac{N_A}{\tau_{1/2}} \quad (\text{equação 21})$$

$\frac{A(T)}{m}$  é a atividade específica do radionuclídeo a ser analisado ( $\frac{\text{átomos}}{\text{gramas}}$ ).

## 2.17. Equilíbrio Radioativo Secular

Nas séries de decaimento radioativo, podemos verificar que os elementos precursores, tais como  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , possuem meias-vidas significativamente maiores do que qualquer um de seus produtos de decaimento. Esse fato é um evento exclusivamente probabilístico, sendo assim, quando o radionuclídeo precursor apresenta uma meia-vida extremamente longa, é provável que se estabeleça a condição de equilíbrio secular ou transitório. O equilíbrio secular ocorre quando a meia-vida do radionuclídeo é muito maior que a dos produtos de decaimento (Ferreira, 2018). Quando o equilíbrio radioativo é atingido pode-se considerar que o radionuclídeo pai (precursor) e o radionuclídeo filho (produto de decaimento) possuem a mesma concentração de atividade. (AQUINO, 2006). Segundo Ketcham (1996), esse equilíbrio só é alcançado se

o sistema permanecer fechado, ou seja, sem interações químicas ou físicas com o ambiente externo, por um longo período.

## 2.18. Dose Absorvida (D)

A grandeza física dose absorvida (D) mede a quantidade de energia média depositada pela radiação em um determinado volume elementar de tecido cuja massa é representada por  $dm$  e sua unidade de medida no SI é o gray (Gy), sendo  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ . A unidade antiga de dose absorvida era o rad (radiation absorbed dose), que em relação ao gray, vale,  $1 \text{ Gy}$  equivale a  $100 \text{ rad}$  (TAUHATA,2014). A equação 22 traz quantitativamente o valor de dose absorvida.

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (\text{equação 22})$$

No entanto, essa grandeza não especifica se a dose foi originada pela radiação alfa ou por radiação beta ou gama, e, por isso, não é possível determinar diretamente os efeitos biológicos resultantes dessa absorção. Por essa razão, é necessário ponderar as doses de acordo com o potencial de cada tipo de radiação em causar danos, sendo a radiação alfa vinte vezes mais danosa em comparação às demais. Esta dose ponderada denomina-se “dose equivalente” (H) equação 23, definida pelo produto de  $D \cdot Q$ , onde  $D$  é dose absorvida média no órgão ou tecido e  $Q$  é o fator de qualidade da radiação (SILVA,2020).

$$H = D \cdot Q \quad (\text{equação 23})$$

O fator de qualidade  $Q$  caracteriza a transferência linear de energia  $L$ , de partículas carregadas em um meio, sendo definido pelo quociente  $\frac{dE}{dl}$ , onde  $dl$  representa a distância percorrida pela partícula e  $dE$  corresponde à energia dissipada nas colisões. O valor de  $Q$  pode ser substituído pelo fator de ponderação da radiação  $w_R$ , um número adimensional utilizado para multiplicar a dose absorvida, de modo a expressar a efetividade da radiação (SILVA,2020). Tabela 3 mostra os valores de  $w_R$  para vários tipos de radiação.

**Tabela 3:** Fatores de Ponderação para Vários Tipos de Radiação Ionizante (ICRP, 2007)

| Tipo de Radiação  | $w_R$ (Sv / Gy)                       |
|---|---------------------------------------|
| Fótons, elétrons e múons                                  | 1                                     |
| Prótons e píons pesados                                   | 2                                     |
| Partículas $\alpha$ , fragmentos de fissão e íons pesados | 20                                    |
| Nêutrons  | Função contínua de energia do nêutron |

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 Sv = 100 rem, 1 rem = 1 cJ/kg) onde Sievert é uma unidade usada para medir o risco de detrimento da radiação sob o corpo humano (SILVA, 2020).

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 taxa de dose de 2,4 mSv por ano. O valor máximo de exposição à radiação recomendado pela (CNEN, 2014) 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 1 mSv (1000  $\mu$ Sv). Esse limite não inclui a exposição à radiação natural ou médica.

### 2.19. Dose Efetiva ( $D_{ef}$ )

É definida como a dose equivalente ponderada para refletir a sensibilidade de diferentes órgãos à exposição à radiação, considerando que algumas partes do corpo são mais suscetíveis aos efeitos da radiação.

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 (SILVA, 2020). Grandeza expressa pela equação 24.

$$D_{ef} = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (\text{equação 24})$$

Onde:  $D_{ef}$  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  $\Sigma T$  é o somatório. A tabela 4 mostra alguns valores de  $w_T$ .

**Tabela 4:** Alguns Fatores de Ponderação ( $w_T$ ), para Alguns Tecidos ou Órgãos T

| <b>Tecido ou órgão</b>   | <b><math>w_T</math></b> |
|--|-------------------------|
| Medula - óssea (vermelha), cólon, pulmão, estômago, mama, glândula adrenal, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, mucosa oral, módulos linfáticos, músculos, pâncreas, próstata, intestino delgado, baço, timo, útero / cervix | 0,20                    |
| Gônadas  | 0,08                    |
| Bexiga, esôfago, tireoide, fígado  | 0,04                    |
| Superfície óssea, glândulas salivares, cérebro e pele  | 0,01                    |

## 2.20. Dose Efetiva por Ingestão

As doses internas devido à radiação são significativas e contribuem em cerca de 80% para dose total recebida pelo homem vinda da radioatividade natural. O principal radioisótopo responsável pela dose interna é o  $^{40}\text{K}$ , contribuindo com cerca de 70% da dose total por ingestão (SCHEIBEL, 2006).

Os elementos incorporados via alimentos são rapidamente absorvidos pelo sistema gastrointestinal. Essa incorporação resultará em dose efetiva comprometida. A ICRP publica atualizações contínuas relativa a valores de coeficientes de conversão referentes a vários radioelementos de atividade ingerida para dose efetiva comprometida. O cálculo é feito levando em conta uma única ingestão, mas pode ser aplicado para ingestões crônicas. Nesse caso, para determinar a dose efetiva comprometida em 50 anos, há de se obter a atividade incorporada a cada ano a partir do consumo de cada alimento e da atividade específica média. Disso obtém-se a contribuição à dose efetiva interna anual que somada durante 50 anos chega-se a dose efetiva comprometida devido a cada radionuclídeo ingerido cronicamente (UMISED, 2007).

A dose efetiva total a partir da ingestão e inalação de radionuclídeos é de 310  $\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ , onde 170  $\mu\text{Sv}$  deve-se ao  $^{40}\text{K}$  e 140  $\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$  aos radionuclídeos das séries do urânio e tório (UNSCEAR, 2000).

### **2.21. Espectrometria Gama**

A espectrometria gama de alta resolução é uma técnica não destrutiva que permite a identificação e a quantificação das concentrações de radionuclídeos emissores gama existentes em uma determinada amostra, sem a necessidade de haver processos de separação química dos elementos constituintes, alcançando alta eficiência, proporcionando uma análise quantitativa e qualitativa precisa dos radionuclídeos. Essa técnica é fundamentada na coleta e na medição das cargas elétricas geradas pela interação da radiação gama que incide sobre um cristal semicondutor de germânio de alta pureza (HPGe) (KNOLL,2010). A detecção de radiação ionizante é o resultado da interação de partículas em algum meio sensível a esta radiação. Para medir a energia da radiação, é necessário escolher um detector cuja amplitude do sinal de saída seja proporcional à energia da radiação. Nessa categoria, incluem-se os detectores cintiladores, os semicondutores, os termoluminescentes e detectores gasosos. No entanto, os detectores gasosos, em geral, apresentam uma eficiência muito baixa para a detecção da radiação gama. Ultimamente a espectrometria gama tem sido amplamente utilizada para determinação de radionuclídeos em diversos tipos de amostras inclusive ambientais.

### **2.22. Sistema Operacional para Aquisição de Espectrometria de Raios Gama**

O sistema de aquisição de espectrometria de raios gama compreende os seguintes componentes:

1. Detector de Germânio Hiper Puro;
2. Fonte de alta tensão para alimentar o detector que possibilita aplicar tensão de 0 – 5000 V;
3. Amplificador dá forma ao pulso (gaussiana, semi-gaussiana, senoidal e etc) de subida rápida vindo do pré-amplificador;
4. Analisador multicanal (MCA – *Multichannel Analyser*);

5. Blindagem construída de chumbo para o detector com uma cavidade adequada para acomodar as amostras;
6. Microcomputador para adaptação do MCA, instalação do *software* de gerenciamento do MCA e armazenamento dos dados (LOPES, 2018).

### **2.23. Características do Detector Semicondutor HPGE**

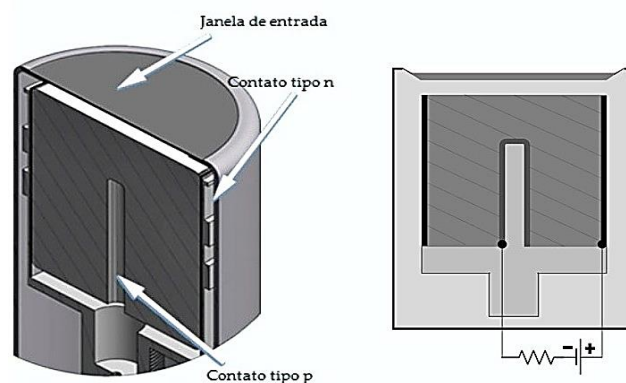
Para este trabalho foi utilizado um detector semicondutor de germânio de alta pureza que consiste em um sólido cristalino com 4 elétrons na sua camada de valência e é do tipo covalente. Os átomos associam-se de forma regular, formando uma estrutura cúbica onde compartilham elétrons das camadas de valência entre si. Quando não há energia térmica presente, os elétrons existentes no cristal preenchem todos os níveis eletrônicos disponíveis, desse modo, no cristal não há passagem de corrente elétrica. O funcionamento se dá através do princípio da excitação de elétrons, que transitam das bandas de valência para a banda de condução, resultando no processo de detecção (KNOLL, 2010), resfriados a temperaturas criogênicas, os elétrons são impedidos de migrar da banda de valência para a banda de condução, sem que tenham recebido a energia proveniente da radiação ionizante. Isso evita a formação de uma corrente de fuga, ou seja, um fluxo de corrente indesejado em um circuito elétrico, geralmente um curto-circuito ou um caminho de baixa impedância, que poderia gerar ruído e comprometer o resultado.

A vantagem de um semicondutor tem relação com a energia média necessária para gerar um par elétron-buraco que é aproximadamente 10 vezes menor do que a requerida para gerar um par elétron-íon. Isso resulta em uma maior resolução em energia, pois a grande quantidade de pares gerados proporciona duas vantagens aos detectores semicondutores no que diz respeito à resolução: reduz as flutuações estatísticas e minimiza a interferência do ruído eletrônico, melhorando a relação sinal-ruído, além disso, devido à sua alta densidade, esses detectores apresentam um poder de frenamento (stopping power) superior em comparação aos detectores gasosos (KNOLL, 2010).

A produção de cristais semicondutores de germânio (Ge) e silício (Si) em tamanhos cada vez maiores possibilitou alcançar eficiências satisfatórias. No entanto, o uso de semicondutores apresenta uma desvantagem na demanda de resfriamento do cristal a temperaturas próximas do azoto líquido (nitrogênio líquido) (77 K) (Marques, 2011).

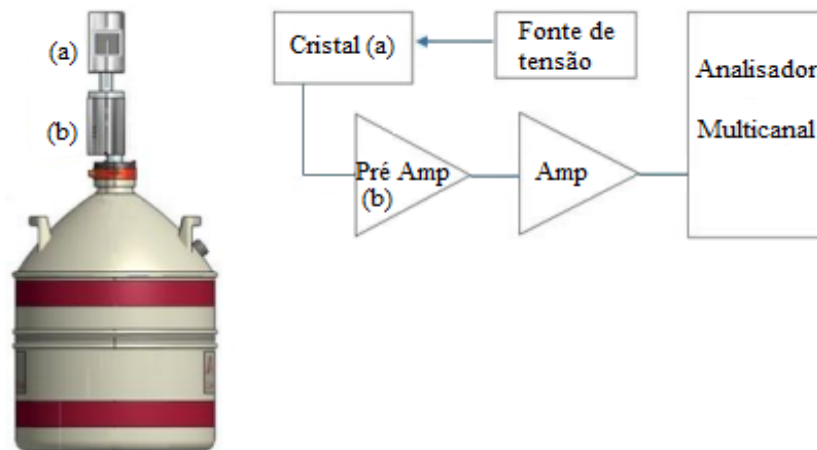
Um detector semiconductor necessita de cristais com volumes suficientemente grandes para que os fótons possam ser capturados e consequentemente detectados. Tal condição pode ser atingida utilizando cristais de alta pureza e os detectores que utilizam esses cristais são conhecidos como detectores de germânio hiper puro (HPGe). Para remoção das impurezas até o nível desejado, ou seja, o menor possível, estes cristais passam por repetidos processos de purificação. As impurezas restantes nestes materiais podem ser do tipo receptora (p) ou doadora (n) de elétrons. O cristal é disposto entre dois eletrodos, e um campo elétrico externo é aplicado ao sistema para estabelecer uma polarização reversa. A faixa entre os contatos p e n possui alta resistividade, o que resulta no impedimento da passagem de corrente elétrica significativa (KNOLL,2010).

A incidência de fótons na região do cristal promove efeitos de ionização (como o efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares), com conseguinte emissão de partículas carregadas livres. Ao longo da trajetória desta partícula carregada, serão produzidos pares elétron-buraco que, sob influência do campo elétrico, se deslocam e são coletados pelos eletrodos, produzindo sinal elétrico. O volume ativo do cristal é a região entre os eletrodos, onde serão produzidas cargas elétricas. No entanto, os contatos p e n podem ter espessuras suficientes para atenuar fótons com energias menores que 200 keV, atuando como uma camada morta na superfície do cristal. Por isso, alguns detectores possuem uma janela de entrada, a qual aumenta a faixa de energia possível de ser detectada (KNOLL, 2010; CANBERRA, 2012). Na Figura 18 é apresentada uma ilustração do cristal em uma configuração coaxial.



**Figura 18:** Esquema Ilustrativo de um Cristal de Germânio em Configuração Coaxial, com Contato Tipo n na Superfície Externa ao Cristal e Janela de Entrada (CAVALCANTE, 2017).

O sinal elétrico gerado pela radiação ionizante é reconhecido por um sistema de pré-amplificação, que converte as cargas elétricas produzidas em pulsos com amplitudes proporcionais à carga total produzida. Em uma próxima etapa, o pulso elétrico passa por outro sistema de amplificação para então ser registrado no analisador multicanal (CAVALCANTE, 2017). O diagrama de blocos do sistema de detecção para espectrometria gama é mostrado na figura 19.



**Figura 19:** Diagrama de blocos de um sistema de detecção para espectrometria gama com configuração vertical. Cargas elétricas são produzidas na interação da radiação com o volume ativo do cristal (a), são processadas pelo pré-amplificador (b) e registradas pelo analisador multicanal (CAVALCANTE,2017).

## 2.24. Blindagem

Sua função consiste em blindar a radiação que não é oriunda da fonte analisada, maximizando assim a taxa de contagem do fóton (picos) de interesse em relação à taxa de contagem de fundo. A radiação de fundo (background) do sistema impacta significativamente na qualidade do espectro obtido por meio da espectrometria de raios gama, por isso é crucial que o sistema apresente radiação de fundo tão baixo quanto possível. Assim, para a análise de amostras ambientais com baixa atividade, é indispensável uma blindagem adequada do detector e da amostra, a fim de diminuir a radiação de fundo do ambiente que pode interferir no espectro da amostra



(CARDOSO,2012). A blindagem no detector HPGe é composta por chumbo, embora outros materiais com número atômico menor também fazem parte da blindagem para absorver os raios X gerados pela interação dos raios gama com o chumbo, diminuindo a sua incidência no detector (LOPES,2018).

A espessura de chumbo utilizada na blindagem depende da atenuação desejada para um dado raio gama. Para aplicações ambientais, 10 cm de chumbo são suficientes para atenuar completamente os raios gama com energia na faixa entre 0 eV a 2 MeV (AAECRE, 1980).

A blindagem do detector HPGe utilizada nesse trabalho é um 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 (SILVA, 2018).

## **2.25. Criostato e Dewar**

No sistema de detecção outra parte importante é o criostato. Ele é responsável por encapsular o cristal sob vácuo para inibir a condutividade térmica entre o cristal e o ar que o envolve, mantendo assim a temperatura criogênica do cristal. É o criostato que define o tipo de geometria do detector que também abriga o Transistor de Campo e de alta Impedância (FET) e o pré-amplificador.

O contato entre o criostato e o dewar é feito através do “Dedo Frio”, que é constituído por uma liga especial de cobre, mergulhado no nitrogênio líquido contido no dewar e conectado ao cristal por um acoplamento especial, evitando a transmissão de choque mecânico. Para absorver gases, principalmente O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, que podem penetrar por suas vedações com o tempo, o criostato é parcialmente preenchido com uma “peneira molecular”. Sem o vácuo, o criostato não conseguiria manter a temperatura do cristal em níveis aceitáveis e permitiria o depósito de umidade nos eletrodos do detector, causando enorme ruído. Pois, a contaminação da superfície acarretaria no aumento da corrente de fuga do detector, e poderia prejudicar a sua resolução em energia. A presença de água e outros contaminantes nas vizinhanças do detector geralmente serão mais significativos quando o detector estiver na temperatura ambiente. Por esta razão, é aconselhável manter os detectores de germânio constantemente na temperatura de nitrogênio líquido como

precaução para assegurar um maior tempo de vida útil (KNOLL, 2010). A Figura 20 traz uma gama de Dewars e Criostatos.



**Figura 20:** Dewars e Criostatos (CAMBERRA, 2012)






## CAPÍTULO 3











### Instrumentação e Metodologia

#### 3.1. Análises das Amostras

Para este estudo foram analisadas 37 espécies de plantas medicinais (26) e ornamentais (11) que contribuíram com 55 estruturas botânicas para análise, são elas: caule, flor, folha, fruto, poupa e semente. As plantas foram adquiridas nos municípios de Belo Horizonte -MG, Nova Iguaçu – RJ, Petrópolis –RJ e Rio de Janeiro –RJ. Os critérios para a aquisição das amostras foi a disponibilidade das plantas nestas localidades. A tabela 5 apresenta o nome comum/científico, além das estruturas botânicas utilizadas na análise, o grupo no qual a planta faz parte (grupo 1 e grupo 2) e para as plantas pertencentes ao grupo 1 suas respectivas propriedades medicinais.






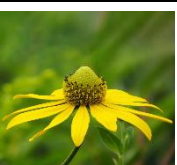




**Tabela 5:** Dados das amostras de plantas analisadas e suas respectivas propriedades medicinais.



| Nome local/Nome comum/Nome científico         | Foto da planta  | Tipo / Planta | Parte usada   | Propriedades Medicinais  |
|---|---|---------------|---------------|--|
| Alho / <i>Allium sativum</i>                  |  | Medicinal     | Poupa         | Antifúngico, Antibiótico e anti-hipertensivo (ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS MEDICINAIS, 2020)       |
| Babosa / <i>Aloe vera</i>                     |  | Medicinal     | Folha         | Anti-inflamatória, Ação Cicatrizante e Antifúngica (ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS MEDICINAIS, 2020) |
| Antúrio / <i>Anthurium andraeanum</i>         |  | Ornamental    | Caule / Folha | —  |
| Bromélia / <i>Bromelia antiacantha bertol</i> |  | Ornamental    | Caule / Flor  | —  |
| Limão Galego / <i>Citrus aurantifolia</i>     |  | Medicinal     | Poupa         | Anti-inflamatório, Antioxidante, Antibiótico e purificador do sangue (COSTA, 2017).            |

|   |   |            |               |  |
|---|---|------------|---------------|--|
| Coqueirinho /<br><i>Cocos nucifera</i>                |    | Ornamental | Folha         | —  |
| Cana do brejo /<br><i>Costus spicatus</i>             |    | Medicinal  | Caule / Folha | Antinociceptiva e anti- inflamatória (ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS MEDICINAIS,2020)                                      |
| Comigo Ninguém Pode /<br><i>Dieffenbachia seguine</i> |    | Ornamental | Folha         | —  |
| Eucalipto /<br><i>Eucalyptus globulus</i>             |    | Medicinal  | Caule / Folha | Antisséptico balsâmico das vias respiratórias, Antiespasmódicas e Antimicrobianas (REIS,2025).                       |
| Pitanga /<br><i>Eugenia uniflora</i>                  |   | Medicinal  | Caule         | Anti- inflamatória, Antioxidante, Analgésico, Anti- hipertensiva (MENEGUELLI, 2022).                                 |
| Funcho /<br><i>Foeniculum vulgaris L.</i>             |  | Medicinal  | Folha         | Antiviral, Antimicrobiana, Antiparasitária, Antioxidante, Antitrombótico. (KHAN E MUSHARAF, 2014;RATHER ET AL, 2016) |
| Girassol /<br><i>Helianthus annuus L.</i>             |  | Medicinal  | Semente       | Antiviral, Antimicrobiana, Antiparasitária, Antioxidante, Antitrombótico. (KHAN E MUSHARAF, 2014;RATHER ET AL, 2016) |
| Hibisco /<br><i>Hibiscus sabdariffa</i>               |  | Ornamental | Caule / Folha | —  |
| Hortênsia /<br><i>Hydrangea macrophylla</i>           |  | Ornamental | Caule         | —  |
| Coração de Maria /<br><i>Iresine herbstii</i>         |  | Ornamental | Caule / Folha | —  |

|   |   |           |               |   |
|---|---|-----------|---------------|---|
| Louro / <i>Laurus nobilis</i> L.              |    | Medicinal | Folha         | Anti-inflamatória, Digestiva, Antioxidante, Diuréticas e Anti-reumática (REIS,2024).  |
| Camomila / <i>Matricaria recutita</i> L.      |    | Medicinal | Flor          | Calmante, Relaxante, no tratamento da gastrite e das cólicas infantis e Menstruais (LOPES,2010).  |
| Espinheira santa / <i>Maytenus ilicifolia</i> |    | Medicinal | Caule / Folha | Antiulcerogênica, Cicatrizante, Antiácido, Antibacteriana, Antiespasmódica, Analgésica e Desintoxicante (ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS MEDICINAIS,2020)          |
| Erva cidreira / <i>Melissa officinalis</i> L. |    | Medicinal | Caule         | Antiespasmódica, Anti-inflamatória, Antimicrobiana, Antinevrálgica, Cicatrizante, Calmante, Relaxante e Sedativa (ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS MEDICINAIS,2020) |
| Hortelã / <i>Mentha piperita</i>              |   | Medicinal | Folha         | Antiespasmódica, Anti- inflamatória, Antimicrobiana e Descongestionante (BALAKRISHNAN,2015; MCKAY E BLUMBERG,2006)  |
| Menta / <i>Mentha spicata</i>                 |  | Medicinal | Folha         | Hipertensão, Diminuição do colesterol, Tratamento de tecidos uterinos (GONÇALVES ET AL.,2017; GÜNEY ET AL; 2006)  |
| Noni / <i>Morinda citrifolia</i>              |  | Medicinal | Caule / Folha | Hipertensão, Diminuição do colesterol, Tratamento de tecidos uterinos (GONÇALVES ET AL.,2017; GÜNEY ET AL; 2006)  |
| Amora / <i>Morus nigra</i>                    |  | Medicinal | Caule / Folha | Hipoglicemiante, Diurética, Expectorante, Emoliente, Anti-inflamatória (ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS MEDICINAIS,2020)   |
| Manjerona / <i>Origanum majorana</i>          |  | Medicinal | Folha         | Hipoglicemiante, Diurética, Expectorante, Emoliente, Anti-inflamatória (ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS MEDICINAIS,2020)   |
| Boldo do chile / <i>Peumus boldus</i>         |  | Medicinal | Folha         | Hipoglicemiante, Diurética, Expectorante, Emoliente, Anti-inflamatória (ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS MEDICINAIS,2020)   |



|  |   |            |                         |  |
|--|---|------------|-------------------------|--|
| Orquídea /<br><i>Phalaenopsis<br/>hybrido</i>                            |    | Ornamental | Caule / Folha           | —  |
| Erva doce /<br><i>Pimpinella<br/>anisum</i>                              |    | Medicinal  | Semente                 | Calmante, Cicatrizante,<br>Expectorante, Melhora a gastrite<br>tosse crônica, Cólicas intestinais e<br>Inflamações (LOPES,2010). |
| Tanchagem /<br><i>Plantago<br/>major</i>                                 |    | Medicinal  | Folha                   | Cicatrizante, Adstringente, Cólicas<br>intestinais e Inflamações<br>(SIMÕES,2010).   |
| Boldo /<br><i>Plectranthus<br/>barbatus</i>                              |    | Medicinal  | Caule / Folha           | Antibacteriana, Antifúngica, Anti-<br>inflamatória, Antimicrobiana,<br>Antioxidante, Desintoxicante<br>(LOPES,2010)              |
| Alecrim /<br><i>Rosmarinus<br/>officinalis</i>                           |   | Medicinal  | Folha                   | Antifúngico, Anti-inflamatória e<br>Antioxidante<br>(ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS<br>MEDICINAIS,2020)                                |
| Equinácea-de-<br>folha-cortada /<br><i>Rudbeckia<br/>laciniata</i>       |  | Ornamental | Caule / Folha<br>/ Flor | —  |
| Sálvia / <i>Salvia<br/>officinalis</i>                                   |  | Medicinal  | Folha                   | Anti- inflamatória, Antioxidante,<br>Hipoglicemiante (REIS,2025).  |
| Espada de são<br>jorge /<br><i>Sansevieria<br/>trifasciata<br/>prain</i> |  | Ornamental | Folha                   | —  |
| Stévia / <i>Stevia<br/>rebaudiana</i>                                    |  | Medicinal  | Folha                   | Reduz a absorção de açúcar, Regula<br>a taxa de glicose no sangue,<br>Diurético, Calmante leve e<br>Desintoxicante (COSTA,2021). |
| Tomilho /<br><i>Thymus<br/>vulgaris</i>                                  |  | Medicinal  | Folha                   | Anti- inflamatória, Antioxidante,<br>expectorante e Antibacteriana<br>(LEAL,2025)  |

|   |   |            |               |  |
|---|---|------------|---------------|--|
| Copo de leite /<br><i>Zantedeschia<br/>aethiopica</i>   |  | Ornamental | Caule / Folha | —  |
| Gengibre /<br><i>Zingiber<br/>officinale<br/>roscoe</i> |  | Medicinal  | Poupa         | Antiasmática, Antibiótica,<br>Antigripal, Anti-inflamatória,<br>Antisséptica e Expectorante<br>(ENCICLOPÉDIA DAS PLANTAS<br>MEDICINAIS, 2020). |

Após a aquisição foi necessário a preparação das amostras bem como a separação de suas estruturas botânicas, esse processo se deu em algumas etapas. Iniciamos com a desidratação das amostras, utilizando uma estufa a temperatura de 100 °C figura 21 (a), fabricada pela 7 lab, modelo SSDic – 40L, tensão 220V e 550 W de potência por um período de 24h. Em seguida utilizou-se um liquidificador figura 21 (b) da marca colombo 2L classe I IPX1, tensão 127/220 V, 700/650 W de potência e 60 Hz de frequência, afim de triturar as amostras e torna-las mais uniforme.



(a)



(b)

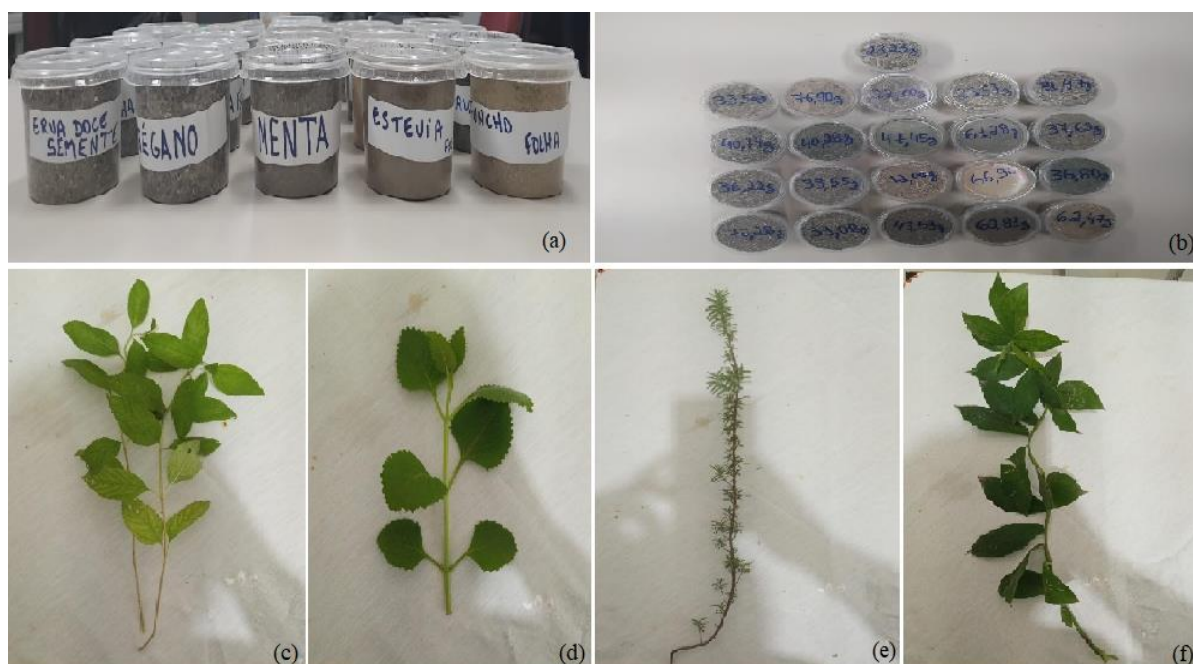
**Figura 21:** Em (a) a estufa e em (b) o liquidificador.

Para aferir as massas das respectivas amostras, foi utilizada uma balança digital da marca Gehaka, modelo BG 4000, com resolução de centésimo do grama ( $\pm 0,01g$ ) ilustrada na figura 22. Antes de preencher os recipientes cilíndricos que são feitos de

polipropileno com capacidade em volume de 145 ml, a tara da balança foi ajustada previamente, afim de verificar somente a massa correspondente a cada estrutura botânica presente na amostra. De modo a evitar desperdícios das massas já verificadas, as amostras foram lacradas com filme plástico transparente. A figura 23 (a) ilustra os recipientes devidamente identificados e preenchidos. Na figura 23 (b) os recipientes estão lacrados e as suas massas indicadas na parte superior. Em 23 (c), (d), (e) e (f), traz uma parte das estruturas botânicas cultivadas para esse estudo.



**Figura 22:** Balança utilizada para aferir a massa das amostras.



**Figura 23:** Em (a) temos a ilustração dos recipientes devidamente identificados e preenchidos. Em (b) os recipientes estão lacrados e as suas massas indicadas na parte



superior. Em (c) temos erva cidreira. Em (d) temos hortelã. Em (e) temos alecrim. Em (f) temos cana do brejo.

Logo depois, as amostras foram condicionadas em um local adequado mantidas em repouso no LAASC (Laboratório de Análise Ambiental e Simulação Computacional), da UFRJ por um período 45 dias, de modo a alcançar a condição do equilíbrio secular.

As amostras analisadas apresentam para cada estrutura constituinte da planta, (caule, flor, folha, poupa e semente) valores de densidades diferentes. Separamos essas estruturas em grupos, de modo a otimizar os cálculos: Grupo 1: Folhas, Grupo 2: Caule, Grupo 3: Flor, Grupo 4: Poupa e Grupo 5: Semente.

Utilizando o programa Geometry Composer determinamos as geometrias de cada grupo, levamos em consideração que dentro de cada grupo as amostras possuíam características químicas, físicas e geométricas semelhantes ou muito próximas, e assim obtemos a caracterização geométrica específica de cada grupo. Para cada grupo a absorção dos fótons se manifesta de modo diferente. A tabela 6 traz o local onde as amostras foram coletadas bem como sua estrutura botânica e suas respectivas massas.

**Tabela 6:** Dados das amostras

| <b>Amostras</b> | <b>Massa (kg)</b> | <b>Parte da Planta</b> | <b>Local</b>        |
|-----------------|-------------------|------------------------|---------------------|
| Alecrim         | 0,04074           | Folha                  | Belo Horizonte - MG |
| Alho            | 0,02946           | Poupa                  | Petrópolis - RJ     |
| Amora           | 0,03006           | Folha                  | Petrópolis - RJ     |
| Amora           | 0,03399           | Caule                  | Petrópolis - RJ     |
| Antúrio         | 0,03261           | Folha                  | Petrópolis - RJ     |
| Antúrio         | 0,05598           | Caule                  | Petrópolis - RJ     |
| Babosa          | 0,06764           | Folha                  | Petrópolis - RJ     |
| Boldo do Chile  | 0,04538           | Folha                  | Petrópolis - RJ     |
| Boldo 1         | 0,04353           | Folha                  | Petrópolis - RJ     |
| Boldo           | 0,04100           | Caule                  | Petrópolis - RJ     |
| Boldo 2         | 0,02359           | Folha                  | Petrópolis - RJ     |
| Bromélia        | 0,03480           | Caule                  | Petrópolis - RJ     |

|                            |         |         |                     |
|----------------------------|---------|---------|---------------------|
| Bromélia                   | 0,02996 | Flor    | Petrópolis - RJ     |
| Camomila                   | 0,02357 | Flor    | Belo Horizonte - MG |
| Cana do Brejo              | 0,02624 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Cana do Brejo              | 0,06956 | Caule   | Petrópolis - RJ     |
| Comigo Ninguém Pode        | 0,04444 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Copo de Leite              | 0,04044 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Copo de Leite              | 0,03816 | Caule   | Petrópolis - RJ     |
| Coqueirinho                | 0,04127 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Coração de Maria           | 0,04743 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Coração de Maria           | 0,04369 | Caule   | Petrópolis - RJ     |
| Equinácea-de-folha-cortada | 0,03786 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Equinácea-de-folha-cortada | 0,04035 | Caule   | Petrópolis - RJ     |
| Equinácea-de-folha-cortada | 0,01101 | Flor    | Petrópolis - RJ     |
| Erva Cidreira              | 0,03352 | Caule   | Rio de Janeiro - RJ |
| Erva Doce                  | 0,07228 | Semente | Belo Horizonte - MG |
| Espada de São Jorge        | 0,09801 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Espinheira Santa           | 0,04745 | Folha   | Rio de Janeiro - RJ |
| Espinheira Santa           | 0,0769  | Caule   | Rio de Janeiro - RJ |
| Eucalipto                  | 0,07200 | Caule   | Rio de Janeiro - RJ |
| Eucalipto                  | 0,06128 | Folha   | Rio de Janeiro - RJ |
| Funcho                     | 0,06247 | Folha   | Rio de Janeiro - RJ |
| Gengibre                   | 0,06690 | Poupa   | Belo Horizonte - MG |
| Girassol                   | 0,04600 | Semente | Nova Iguaçu - RJ    |
| Hibísco                    | 0,06345 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Hibísco                    | 0,04278 | Caule   | Petrópolis - RJ     |
| Hortelã                    | 0,02245 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Hortênsia                  | 0,02749 | Caule   | Petrópolis - RJ     |
| Limão Galego               | 0,0708  | Poupa   | Petrópolis - RJ     |
| Louro                      | 0,04332 | Folha   | Petrópolis - RJ     |
| Manjerona                  | 0,03769 | Folha   | Belo Horizonte - MG |

|             |         |       |                     |
|-------------|---------|-------|---------------------|
| Menta       | 0,04359 | Folha | Belo Horizonte - MG |
| Noni 1      | 0,05083 | Folha | Petrópolis - RJ     |
| Noni        | 0,03926 | Caule | Petrópolis - RJ     |
| Noni 2      | 0,03947 | Folha | Petrópolis - RJ     |
| Orquídea    | 0,02449 | Folha | Petrópolis - RJ     |
| Orquídea 1  | 0,02646 | Caule | Petrópolis - RJ     |
| Orquídea 2  | 0,01824 | Caule | Petrópolis - RJ     |
| Pitanga     | 0,08948 | Caule | Petrópolis - RJ     |
| Sálvia      | 0,03355 | Folha | Rio de Janeiro - RJ |
| Stévia      | 0,06081 | Folha | Rio de Janeiro - RJ |
| Tomilho     | 0,03622 | Folha | Belo Horizonte - MG |
| Tanchagem 1 | 0,04028 | Folha | Rio de Janeiro - RJ |
| Tanchagem 2 | 0,03014 | Folha | Petrópolis - RJ     |

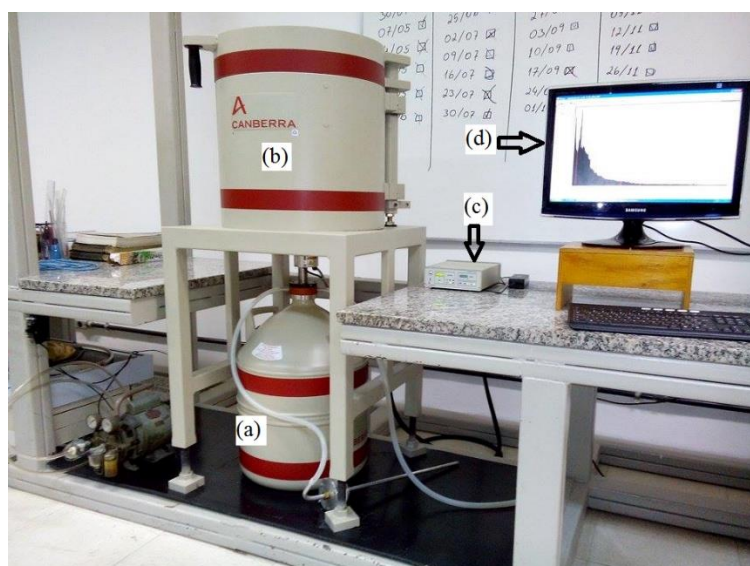
Para obter os espectros de emissão gama foi utilizado um detector de Germânio Hiper-Puro (HPGe) vertical da Canberra, modelo GC3020, com eficiência relativa de 30%. O cristal de germânio tipo coaxial, com 62 mm de diâmetro e 40 mm de altura. Este detector tem resolução em energia especificada pelo fabricante de 1,808 keV para o pico de 1332 keV do  $^{60}\text{Co}$  (CAMBERRA, 2012).

O pré-amplificador do tipo RC modelo 2002C, está acoplado ao detector no criostato, operando com baixo ruído por estar em equilíbrio térmico com nitrogênio líquido. O criostato tem modelo 7500SL e o dewar com capacidade de 30 litros (CAMBERRA, 2012).

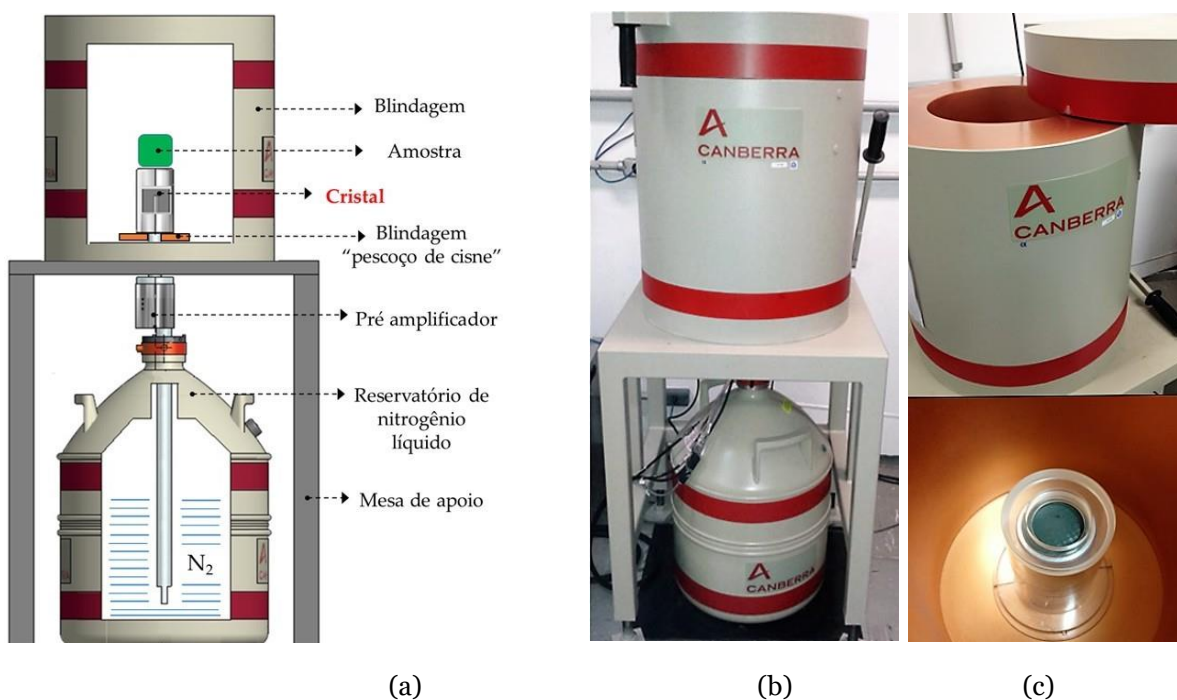
O sistema multicanal utilizado foi um DSA 1000 (Digital Spectrum Analyzer), de 8192 canais, com faixa de energia de 50 keV até 2 MeV. A voltagem usada para criar área de depleção foi de 4500 volts (CAMBERRA, 2012).

O software de análise Gama do pacote Genie 2000 oferece uma série de algoritmos avançados para processamento adicional de espectros gama coletados. Esses algoritmos permitem uma análise completa dos espectros, incluindo cálculo de área, largura a meia altura (FWHM), eficiência e a possibilidade de personalizar bibliotecas de

radionuclídeos, entre outros recursos. O software é baseado em metodologias amplamente aceitas e constantemente aprimoradas ao longo do tempo. A figura 24 apresenta o sistema de aquisição de dados usado neste estudo, enquanto a figura 25 ilustra o sistema de detecção.



**Figura 24:** Espectrômetro Utilizado: Em (a) observa-se o “dewar”. Em (b) a blindagem do detector com baixo fundo de radiação. Em (c) O multicanal DSA 1000. Em (d) o espectro de uma amostra na tela de um computador.



**Figura 25:** Ilustração do Sistema de Detecção (a) Ilustração do sistema de detecção com amostra posicionada sobre o cristal, instalado dentro de uma blindagem de chumbo

com baixa radiação de fundo. O sistema é mantido em temperatura baixa por um reservatório de nitrogênio líquido. (b) Foto do sistema e (c) detalhes da blindagem citada e janela de carbono sobre o cristal (CAVALCANTE, 2017).

### **3.2. Calibração em Energia do Sistema de Aquisição**

A calibração em energia é realizada com o auxílio do software Gamma Analysis do Genie 2000, responsável pelo controle e armazenamento dos dados adquiridos pelo MCA (DSA 1000), que faz um ajuste linear quando duas linhas de energia são definidas e um ajuste quadrático se três ou mais linhas de energia são definidas (LOPES, 2018). A calibração em energética do sistema foi realizada por meio de fontes radioativas certificadas, resultando em pontos experimentais que representam os picos energéticos dos radionuclídeos.

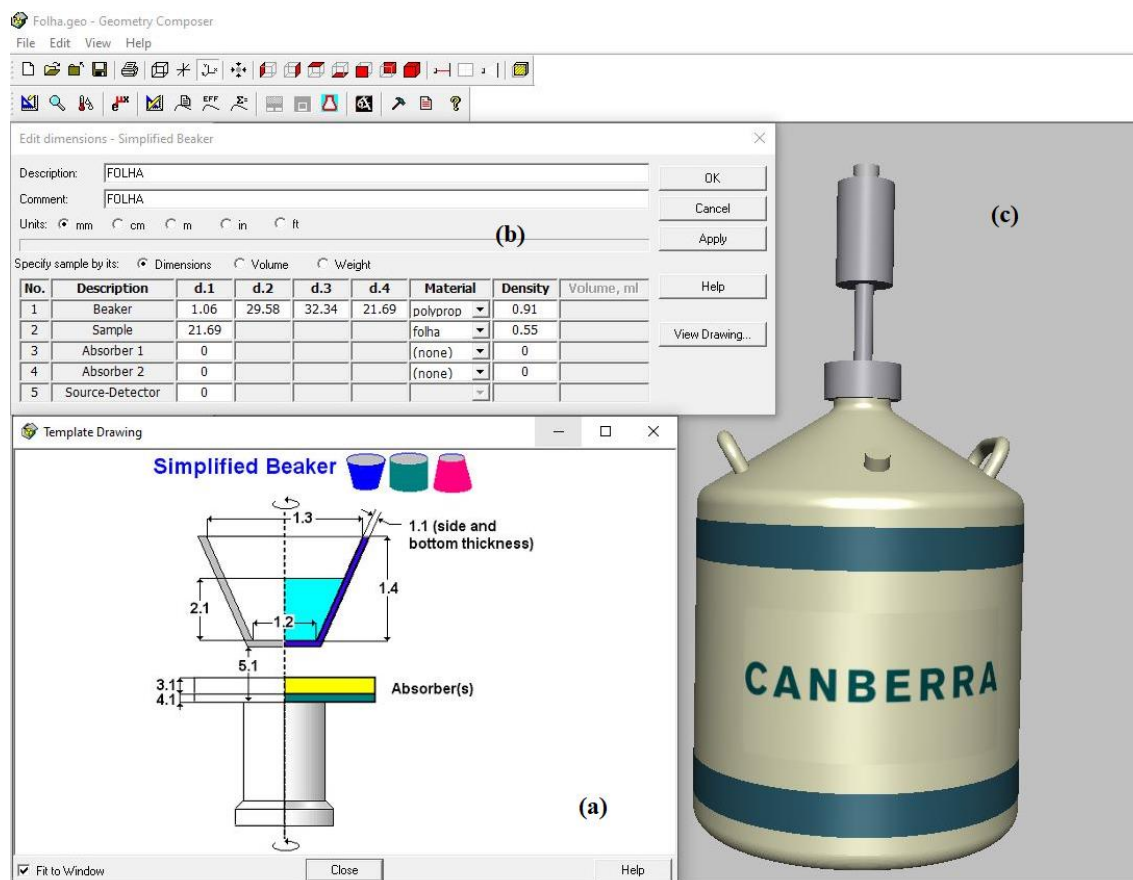
Com a calibração em energia, foi possível identificar os radionuclídeos presentes nas amostras e, conseqüentemente, determinar as áreas líquidas de cada fotopico de interesse em contagens, obtidas por meio da aquisição dos espectros pela eletrônica associada. Dessa forma, as contagens registradas nas amostras medidas, puderam ser convertidas em atividade.

### **3.3. 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. Caso o LabSOCS não fosse utilizado, seria preciso recorrer à comparação com padrões já estabelecidos, pois esses padrões possuem atividades conhecidas que servem de referência para calibrar o sistema. Essa comparação é crucial para determinar a eficiência do detector, considerando que ela varia de acordo com a energia dos raios gama, a geometria da amostra e outros fatores. Assim, os padrões permitem ajustar a resposta do equipamento, garantindo que as contagens medidas sejam convertidas com precisão na atividade real presente nas amostras. Entretanto, o software permite uma calibração rápida e precisa de várias geometrias sem necessidade de fontes de referência. O programa 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.



2018). A figura 27 mostra a visualização gráfica do Geometry Composer, integrante do pacote de softwares LabSOCS.



**Figura 27:** 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 recipiente, como proposto em (a). Em (c) é possível observar a representação gráfica das inserções realizadas de acordo com a geometria requerida.

### 3.4. Validação do Sistema de Detecção

A validação foi realizada com o uso de fontes certificadas em três geometrias distintas, já que é necessário comparar a eficiência e a calibração com o padrão pré-estabelecido pelo IRD. Foram empregadas fontes pontuais e ampolas contendo padrão líquido, ambas certificadas pela Divisão de Metrologia (DIMET) do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI-IRD/CNEN), além de um padrão radioativo de  $^{40}\text{K}$  em geometria do tipo Marinelli, certificado pela AMETEK/Ortec (SER: 16200494 – M: 934322). A validação do sistema de detecção baseia-se na comparação entre os valores de eficiência de cada energia de emissão gama, obtidos experimentalmente, e os cálculos realizados pelo LabSOCS (SILVA, 2020).

Para determinar a eficiência de detecção experimental (" $E_{exp}$ "), é essencial conhecer a contagem gama do detector para uma determinada energia ( $E_1$ ). Essa contagem foi realizada em um período de aproximadamente 15 minutos, garantindo que a incerteza da área permanecesse abaixo de 0,5%. Em seguida, aplicando as equações do decaimento radioativo e os valores de atividade, foi estimado o número de emissões do radionuclídeo para o intervalo de tempo estabelecido ( $E_2$ ). Dessa forma, a eficiência de detecção experimental é determinada pela razão  $E_1/E_2$ . Já para o cálculo da eficiência simulada " $E_{LabSOCS}$ ", foi adotada a metodologia apresentada na seção 3.4. O desvio percentual entre os valores simulados e experimentais (" $D$ ") é calculado conforme a equação 34 (SILVA, 2020).

$$D = \frac{E_{LabSOCS} - E_{exp.}}{E_{exp.}} \times 100 \quad (\text{equação 34})$$

### 3.5. 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 7.

**Tabela 7:** Pontos Experimentais Utilizado para Ajuste Linear em Energia. Adaptado (SILVA, 2020).

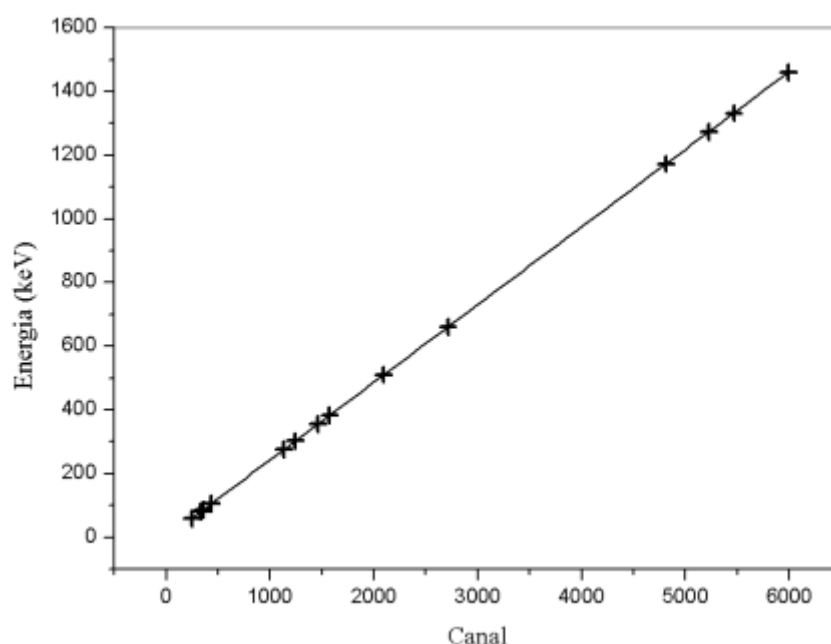
| Radionuclídeos    | Energia ( keV ) | Canal | Radionuclídeos    | Energia ( keV ) | Canal |
|-------------------|-----------------|-------|-------------------|-----------------|-------|
| <sup>241</sup> Am | 59,5            | 245   | <sup>133</sup> Ba | 383,9           | 1574  |
| <sup>133</sup> Ba | 81,0            | 333   | <sup>22</sup> Na  | 511,0           | 2094  |
| <sup>155</sup> Eu | 86,5            | 356   | <sup>137</sup> Cs | 661,7           | 2712  |
| <sup>155</sup> Eu | 105,3           | 433   | <sup>60</sup> Co  | 1173,2          | 4812  |
| <sup>133</sup> Ba | 276,4           | 1133  | <sup>22</sup> Na  | 1274,5          | 5225  |
| <sup>133</sup> Ba | 302,8           | 1242  | <sup>60</sup> Co  | 1332,5          | 5465  |
| <sup>133</sup> Ba | 356,0           | 1460  | <sup>40</sup> K   | 1460,8          | 5989  |



A equação 35 representa a relação entre canal e energia para todo o espectro utilizado nesse trabalho.

$$y = 0,24x - 0,13 \quad (\text{equação 35})$$

A energia corresponde ao eixo das ordenadas enquanto o canal corresponde ao eixo das abscissas. O coeficiente de determinação do ajuste é de  $R^2 = 0,99$ . O ajuste em energia para espectrometria gama é mostrado na figura 28.



**Figura 28:** Reta de ajuste em energia para espectrometria gama (SILVA, 2020).

### 3.6. Cálculo da Atividade Específica

O método mais preciso para determinar a concentração de atividade específica de radionuclídeos consiste em utilizar uma fonte padrão adequada com dimensões geométricas semelhantes, densidade e composições químicas para a amostra em análise (Díaz, 2008).

Quando o espectro gama de uma amostra é obtido, é possível identificar os radionuclídeos emissores presentes nesta amostra através da calibração em energia. Após essa identificação, um aspecto essencial na análise radiométrica é determinar a atividade

específica do radionuclídeo, o que envolve alguns parâmetros a serem utilizados, apresentados na equação 25 (IAEA, 1989):

$$CA_{\text{esp}} = \frac{N_L}{\epsilon \cdot P_\gamma \cdot t \cdot m} \quad (\text{equação 25})$$

Onde  $A_{\text{esp}}$  é a atividade específica do radionuclídeo dado em  $\text{Bq.kg}^{-1}$ .  $N_L$  é a área líquida do fotopico de interesse,  $m$  é a massa da amostra em kg,  $\epsilon$  é eficiência de contagem para uma energia específica ( $\gamma$ ),  $P_\gamma$  é a probabilidade de emissão gama ( $\gamma$ ) para dado radionuclídeo e  $t$  é o tempo de contagem em segundos.

A área líquida de contagem é a quantidade total de contagens na área do pico de energia de interesse descontado do fundo Compton e do background. Para subtração dos espectros foi utilizado o software Genie 2000. O número de contagens depende da eficiência de detecção, que por sua vez, depende da energia do fóton emitido, das características físicas do detector, das características físicas da amostra e do tempo de contagem, que para este trabalho foi de 28800 segundos que corresponde a 8 horas.

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 (JÚNIOR *et al.*, 2009):

(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.

Para medir a concentração específica de  $^{40}\text{K}$ , usou-se a energia de decaimento gama de (1460,8 keV). Para determinar a concentração específica de  $^{226}\text{Ra}$ , foi utilizada uma linha de emissão do  $^{214}\text{Pb}$  (294,5 keV),  $^{214}\text{Pb}$  (351,7 keV) e  $^{214}\text{Bi}$  (609,3 keV). Para determinar a concentração específica de  $^{228}\text{Ra}$ , utilizou-se uma linha de emissão do  $^{228}\text{Ac}$  (337,5 keV),  $^{228}\text{Ac}$  (911,1 keV) e  $^{228}\text{Ac}$  (969 keV). Para determinar a concentração específica do  $^{232}\text{Th}$ , foi utilizada a linha de emissão do  $^{212}\text{Pb}$  (238,6 keV).

### 3.7. Incertezas da Atividade Específica

O erro relativo à atividade específica foi determinado a partir da equação 25 e a incerteza associada foi estimada utilizando a propagação de erros, de acordo com a equação 26.

$$\delta CA_{\text{esp}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\varepsilon \cdot P_{\gamma} \cdot m \cdot t}\right)^2 \cdot \delta N_L^2 + \left(\frac{N_L}{\varepsilon^2 \cdot P_{\gamma} \cdot m \cdot t}\right)^2 \cdot \delta \varepsilon^2 + \left(\frac{N_L}{\varepsilon \cdot P_{\gamma}^2 \cdot m \cdot t}\right)^2 \cdot \delta P_{\gamma}^2} \quad (\text{equação 26})$$

Onde:

$\delta CA_{\text{esp}}$ : é a incerteza da atividade específica

$\delta N_L$ : é a incerteza da área líquida fornecida pelo Genie 2000

$\delta \varepsilon$ : É a incerteza associada à eficiência de detecção fornecida pelo LabSOCS

$\delta P_{\gamma}$ : É a incerteza da probabilidade de emissão do fóton de interesse

Para este trabalho, os valores de massa e de tempo foram considerados absolutos. Podemos também associar incertezas a possíveis erros humanos, quanto ao procedimento de análise realizado, a radiação natural de fundo, a geometria das amostras entre outros. Entretanto, foi considerado as incertezas de maiores relevâncias que influenciam de maneira direta no resultado.

As equações 25 e 26 são válidas quando o radionuclídeo de interesse tem somente uma transição gama. Para radionuclídeos com mais de uma transição, a concentração de atividade e sua incerteza são calculadas respectivamente por meio das equações 27 e 28 (SILVA, 2020).

$$CA_{\text{esp}} = \frac{\sum \frac{A_i}{\sigma_i^2}}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (\text{equação 27})$$

$$\sigma_A = \frac{1}{2\sqrt{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (\text{equação 28})$$

Onde:

A: concentração média da atividade [Bq.kg<sup>-1</sup>];

A<sub>i</sub>: concentração de atividade da i-ésima transição gama detectada [Bq.kg<sup>-1</sup>];

σ<sub>i</sub>: incerteza (equação 3.4) associada à i-ésima transição gama detectada; e

σ<sub>A</sub>: incerteza da concentração de atividade média.

### 3.8. Atividade Mínima Detectável (AMD)

A Atividade Mínima de Detecção (MDA) foi calculada para cada amostra com nível de confiança de 95% (equação (29)). O parâmetro σ é o desvio padrão do pico de interesse no fundo medido no tempo t (LOPES, 2018).

$$MDA(\text{Bq.kg}^{-1}) = \frac{2,71+4,66 \cdot \sigma}{P_Y \cdot t \cdot m \cdot \varepsilon} \quad (\text{equação 29})$$

### 3.9. Cálculo de Dose Efetiva Comprometida

Para o cálculo de dose efetiva, foi estimado que uma pessoa consome em média 1kg de plantas medicinais por ano. A dose efetiva anual de radionuclídeos nas plantas medicinais foi calculada utilizando a equação 30:

$$D_{\text{ef}} = D_f \times U \times C_A \quad (\text{equação 30})$$

Onde:

D<sub>ef</sub> é a dose efetiva anual (μSv.ano<sup>-1</sup>);

D<sub>f</sub> é o coeficiente de dose publicado pela CNEN (Sv.Bq<sup>-1</sup>);

U é a quantidade de planta medicinal consumida em um ano (kg/ano);

$C_A$  a concentração específica do radionuclídeo na planta medicinal ( $Bq.kg^{-1}$ );

Na tabela 8 mostra os valores dos coeficientes de dose referentes aos radionuclídeos  $^{226}Ra$ ,  $^{228}Ra$ ,  $^{228}Th$  e  $^{40}K$  para o cálculo da dose efetiva comprometida.

**Tabela 8:** Determinação dos coeficientes de Dose Publicados pela (CNEN, 2014).

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

$f_1$ - absorção nacional (fator de transferência do radionuclídeo do trato gastrointestinal)

O fator de ponderação da radiação é um fator adimensional usado para obter a dose equivalente a partir da dose absorvida média sobre um tecido ou órgão e baseia-se no tipo de radiação absorvida. O fator de ponderação da radiação para fótons igual a 1. Para fins de proteção radiológica, foram determinadas as sensibilidades de diferentes órgãos ou tecidos, efeitos estocásticos da radiação e, em seguida, multiplicam as sensibilidades pela dose equivalente para calcular a quantidade de dose equivalente recebida por esses órgãos ou tecidos. Os fatores de ponderação tecidual para estômago, gônadas, tireoide e pele são 0,20, 0,08, 0,04 e 0,01, respectivamente (CNEN, 2018). A dose efetiva anual de  $D_{ef}$  acumulado em qualquer órgão do tecido humano, pode ser obtido pela equação 31:

$$D_{ef} = D_{ef} \times W_t \quad (\text{equação 31})$$

Onde:  $W_t$ : é o fator de ponderação do tecido.

### 3.10. 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  $0,05 \text{ Sv}^{-1}$  (ICRP, 1990). 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 referente a uma pessoa adulta usamos a equação 32 (ICRP, 2007):

$$R_c = C_{\text{efv}} \times \text{RF} (\text{Sv}^{-1}) \quad (\text{equação 32})$$

Onde: RF é fator de risco ( $\text{Sv}^{-1}$ ), risco fatal de câncer por Sivert. Para efeitos estocásticos, a ICRP 60 usa valores de 0,05 para o público (ICRP, 1990).  $C_{\text{efv}}$  é a dose efetiva da vida útil, que é uma medida da dose efetiva total recebida durante uma vida útil média de 76,4 anos (IBGE, 2023) após a ingestão de um radionuclídeo.  $C_d$  foi calculado usando a equação 33 (UNSCEAR, 2000):

$$C_{\text{efv}} = 76,4 \times D \quad (\text{equação 33})$$

Onde D é a dose efetiva total para um indivíduo.

## CAPÍTULO 4

### Resultados e Discussões

#### 4.1. Análises das Concentrações de Atividades dos Radionuclídeos

A tabela 9 apresenta a distribuição da concentração de atividade dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$  das cinquenta e cinco amostras das plantas medicinais e ornamentais analisadas e a tabela 10 apresenta a concentração de atividade total dos radionuclídeos das cinquenta e cinco amostras de plantas medicinais e ornamentais que foram analisadas no presente trabalho.

**Tabela 9:** Concentração de Atividades Específicas ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )

| Plantas        | Parte | $^{40}\text{K}$    | $^{226}\text{Ra}$ | $^{228}\text{Ra}$ | $^{228}\text{Th}$ |
|----------------|-------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Alecrim        | Folha | $227,36 \pm 15,41$ | $1,21 \pm 0,66$   | $2,13 \pm 0,51$   | $2,11 \pm 0,82$   |
| Alho           | Poupa | $29,41 \pm 9,85$   | $< 1,41$          | $< 2,16$          | $< 1,03$          |
| Amora          | Folha | $416,20 \pm 29,57$ | $2,70 \pm 1,33$   | $7,21 \pm 0,79$   | $< 1,59$          |
| Amora          | Caule | $< 26,82$          | $< 1,93$          | $7,05 \pm 0,75$   | $4,28 \pm 1,49$   |
| Antúrio        | Folha | $540,56 \pm 33,04$ | $< 2,01$          | $9,44 \pm 0,78$   | $< 1,46$          |
| Antúrio        | Caule | $41,97 \pm 8,84$   | $2,35 \pm 0,75$   | $7,99 \pm 0,59$   | $4,32 \pm 1,04$   |
| Babosa         | Folha | $279,92 \pm 16,65$ | $1,02 \pm 0,60$   | $4,22 \pm 0,50$   | $2,61 \pm 0,79$   |
| Boldo do Chile | Folha | $918,21 \pm 44,03$ | $6,08 \pm 1,02$   | $18,62 \pm 0,75$  | $7,70 \pm 1,44$   |
| Boldo 1        | Folha | $139,47 \pm 14,69$ | $1,57 \pm 0,82$   | $3,67 \pm 0,62$   | $3,39 \pm 1,07$   |
| Boldo          | Caule | $43,82 \pm 11,86$  | $< 4,08$          | $4,77 \pm 0,61$   | $1,71 \pm 1,13$   |
| Boldo 2        | Folha | $314,72 \pm 30,26$ | $4,85 \pm 1,72$   | $8,97 \pm 0,86$   | $3,89 \pm 2,07$   |
| Bromélia       | Caule | $38,89 \pm 13,47$  | $3,21 \pm 1,16$   | $6,05 \pm 0,73$   | $1,70 \pm 1,36$   |
| Bromélia       | Flor  | $103,15 \pm 18,15$ | $2,68 \pm 1,33$   | $< 3,40$          | $< 1,60$          |

|                            |         |                |             |              |              |
|----------------------------|---------|----------------|-------------|--------------|--------------|
| Camomila                   | Flor    | 178,53 ± 15,79 | < 1,34      | 3,38 ± 0,60  | 1,02 ± 0,98  |
| Cana do Brejo              | Folha   | 134,77 ± 22,01 | < 2,49      | < 3,87       | < 1,82       |
| Cana do Brejo              | Caule   | 74,94 ± 8,74   | < 0,95      | < 1,46       | < 0,69       |
| Comigo Ninguém Pode        | Folha   | 569,84 ± 30,70 | 2,08 ± 0,91 | 9,18 ± 0,67  | 2,96 ± 1,10  |
| Copo de Leite              | Folha   | 892,21 ± 44,17 | 3,22 ± 1,03 | 11,32 ± 0,72 | 3,29 ± 1,25  |
| Copo de Leite              | Caule   | 921,72 ± 45,87 | 5,08 ± 1,13 | 8,47 ± 0,75  | 3,72 ± 1,35  |
| Coqueirinho                | Folha   | 164,83 ± 16,53 | 3,30 ± 0,99 | 4,56 ± 0,67  | 3,38 ± 1,16  |
| Coração de Maria           | Folha   | 428,03 ± 24,74 | 2,70 ± 0,87 | 8,73 ± 0,64  | 2,47 ± 1,06  |
| Coração de Maria           | Caule   | 560,30 ± 30,64 | < 1,51      | 7,51 ± 0,68  | 1,31 ± 1,13  |
| Equinácea-de-folha-cortada | Folha   | 281,01 ± 21,64 | < 1,73      | 4,94 ± 0,74  | 1,49 ± 1,33  |
| Equinácea-de-folha-cortada | Caule   | 199,94 ± 17,84 | < 1,63      | 3,27 ± 0,69  | < 1,19       |
| Equinácea-de-folha-cortada | Flor    | 123,97 ± 13,29 | < 1,34      | 4,19 ± 0,58  | < 0,98       |
| Erva Cidreira              | Caule   | 198,13 ± 18,23 | 4,65 ± 1,11 | 25,83 ± 0,80 | 10,65 ± 1,66 |
| Erva Doce                  | Semente | 421,96 ± 24,37 | < 1,32      | 5,21 ± 0,62  | < 0,96       |
| Espada de São Jorge        | Folha   | 290,68 ± 15,21 | 2,10 ± 0,45 | 4,58 ± 0,37  | 2,07 ± 0,57  |
| Espinheira Santa           | Folha   | 129,51 ± 13,77 | < 1,38      | 4,32 ± 0,62  | 1,49 ± 1,02  |
| Espinheira Santa           | Caule   | 123,25 ± 15,61 | < 1,68      | < 2,60       | 1,53 ± 1,24  |
| Eucalipto                  | Folha   | 100,58 ± 10,77 | < 1,07      | 5,89 ± 0,54  | 2,92 ± 0,86  |
| Eucalipto                  | Caule   | 165,12 ± 17,05 | 4,00 ± 1,06 | 8,61 ± 0,74  | 5,72 ± 1,40  |
| Funcho                     | Folha   | 376,72 ± 21,04 | 2,02 ± 0,66 | 2,89 ± 0,52  | < 0,77       |

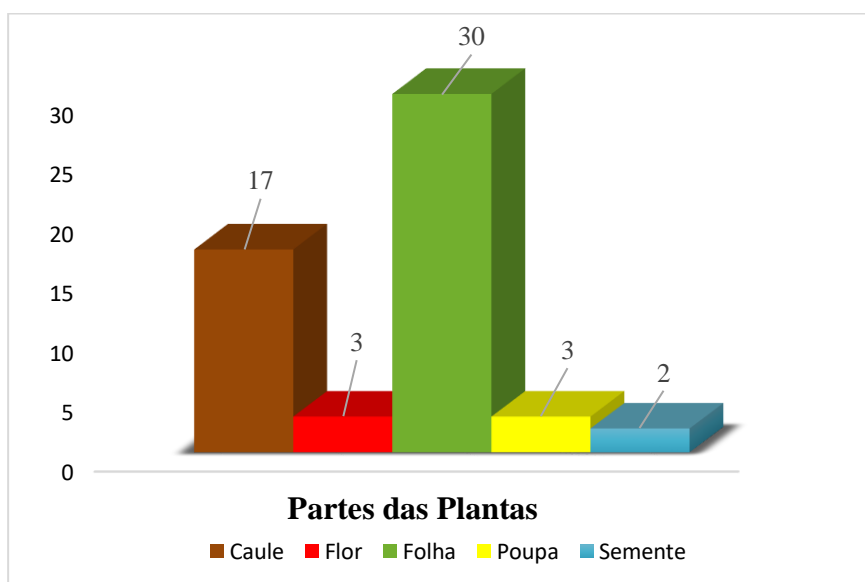


|              |         |                |             |              |             |
|--------------|---------|----------------|-------------|--------------|-------------|
| Gengibre     | Poupa   | 237,43 ± 17,51 | < 1,40      | 3,45 ± 0,65  | 3,37 ± 1,12 |
| Girassol     | Semente | 48,29 ± 10,15  | < 1,33      | < 2,06       | < 0,97      |
| Hibisco      | Folha   | 373,98 ± 20,82 | 2,40 ± 0,68 | 6,67 ± 0,55  | 1,12 ± 0,83 |
| Hibisco      | Caule   | 391,27 ± 25,40 | < 1,68      | 4,98 ± 0,71  | < 1,23      |
| Hortelã      | Folha   | 330,70 ± 30,60 | < 2,92      | 9,83 ± 0,84  | < 2,12      |
| Hortência    | Caule   | 57,01 ± 17,38  | < 2,39      | 11,44 ± 0,84 | 6,02 ± 1,97 |
| Limão Galego | Poupa   | 137,54 ± 13,74 | < 1,40      | < 2,16       | < 1,03      |
| Louro        | Folha   | < 20,98        | < 1,51      | 2,74 ± 0,53  | < 1,11      |
| Manjerona    | Folha   | < 14,85        | 1,66 ± 0,68 | 4,76 ± 0,55  | 2,14 ± 0,85 |
| Menta        | Folha   | 420,51 ± 25,36 | 2,58 ± 0,93 | 8,45 ± 0,70  | 4,79 ± 1,26 |
| Noni         | Folha   | 133,48 ± 13,27 | < 1,29      | 4,03 ± 0,59  | < 0,94      |
| Noni         | Caule   | 167,66 ± 17,15 | 1,72 ± 1,02 | 3,78 ± 0,69  | 1,85 ± 1,27 |
| Noni 2       | Folha   | 122,97 ± 15,22 | 2,49 ± 1,01 | 4,41 ± 0,70  | 2,15 ± 1,25 |
| Orquídea     | Folha   | 351,02 ± 30,53 | < 2,67      | < 5,19       | < 1,95      |
| Orquídea 1   | Caule   | < 34,45        | < 2,48      | < 3,85       | < 1,82      |
| Orquídea 2   | Caule   | < 23,23        | < 1,68      | < 2,60       | < 1,22      |
| Pitanga      | Caule   | 209,27 ± 12,46 | < 0,74      | 1,60 ± 0,37  | < 0,54      |
| Sálvia       | Folha   | 300,01 ± 23,56 | < 1,95      | < 3,03       | 2,78 ± 1,46 |
| Stévia       | Folha   | 254,99 ± 16,30 | 3,19 ± 0,70 | 3,48 ± 0,57  | 4,05 ± 0,92 |
| Tomilho      | Folha   | 302,07 ± 22,85 | 1,86 ± 1,12 | 5,71 ± 0,73  | 1,83 ± 1,34 |
| Tanchagem 1  | Folha   | 142,02 ± 18,76 | 3,63 ± 1,21 | 10,57 ± 0,77 | < 1,58      |

**Tabela 10:** Análise Quantitativa das Concentrações de Atividade

| Radionuclídeos    | Atividade ( Bq.kg <sup>1</sup> ) | Percentual |
|-------------------|----------------------------------|------------|
| <sup>40</sup> K   | 13847,16                         | 96,60%     |
| <sup>226</sup> Ra | 77,45                            | 0,54%      |
| <sup>228</sup> Ra | 300,15                           | 2,09%      |
| <sup>228</sup> Th | 109,72                           | 0,77%      |

Neste estudo, todas as cinquenta e cinco amostras de plantas medicinais e ornamentais foram analisadas utilizando o método não destrutivo de espectrometria gama com o intuito de aferir a concentração de atividade dos radionuclídeos <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>228</sup>Th e <sup>40</sup>K. Essas amostras são constituídas pelas seguintes estruturas botânicas: caule 30,91%, flor 5,45%, folha 54,55%, poupa 5,45% e semente 3,64%. A figura 29 traz quantitativamente as estruturas botânicas das amostras de plantas medicinais e ornamentais analisadas.



**Figura 29:** Estruturas botânicas de plantas medicinais e ornamentais analisadas.

Para o  $^{40}\text{K}$ , cinquenta (90,91%) amostras apresentam valores de concentração de atividade superiores à atividade mínima detectável (MDA). O caule da Amora (*Morus nigra*), a folha de Louro (*Laurus nobilis L.*), a folha de Manjerona (*Origanum majorana*) e os caules das Orquídea 1 e Orquídea 2 (*Phalaenopsis hybrido*), apresentaram valores inferiores ao MDA.

Para o  $^{226}\text{Ra}$ , vinte e sete (49,09%) amostras apresentam valores de concentração de atividade superiores a atividade mínima detectável (MDA), enquanto vinte e oito (50,91%) amostras apresentam valores inferiores ao limite mínimo de detecção (MDA).

Para o  $^{228}\text{Ra}$ , quarenta e quatro (80%) amostras apresentam valores de concentração de atividade superiores a atividade mínima detectável (MDA), ao passo de onze (20%) amostras apresentarem valores inferiores ao limite mínimo de detecção.

Para o  $^{228}\text{Th}$ , trinta e quatro (61,82%) amostras apresentam valores de concentração de atividade superiores a atividade mínima detectável (MDA), em contrapartida vinte e uma (38,18%) amostras apresentaram valores inferiores ao MDA.

Estas relações podem ser resultado da absorção dos radionuclídeos nas amostras, uma vez que, as plantas têm preferência em absorver mais potássio para manter seu equilíbrio metabólico. O  $^{226}\text{Ra}$ , tem uma menor mobilidade no substrato fibroso das plantas apresentando menor relação em massa nas amostras analisadas. A tabela 11 apresenta os valores máximo, mínimo e a média do MDA referente aos resultados obtidos neste trabalho.

**Tabela 11:** Valor de MDA ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) para o  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  referentes as amostras analisadas.

| <b>MDA (<math>\text{Bq.kg}^{-1}</math>)</b> |               |              |               |
|---|---------------|--------------|---------------|
|   | <b>Mínimo</b> | <b>Média</b> | <b>Máximo</b> |
| <b><math>^{40}\text{K}</math></b>           | 20,98         | 26,37        | 34,45         |
| <b><math>^{226}\text{Ra}</math></b>         | 0,74          | 1,76         | 4,08          |
| <b><math>^{228}\text{Ra}</math></b>         | 1,46          | 2,94         | 5,19          |
| <b><math>^{228}\text{Th}</math></b>         | 0,54          | 1,27         | 2,12          |

Os valores relativos ao MDA do radionuclídeo  $^{226}\text{Ra}$  das amostras analisadas é mínimo para o caule da Pitanga (*Eugenia uniflora*), enquanto o valor máximo é referente ao caule de Boldo (*Plectranthus barbatus*).

Para os valores relativos ao MDA do radionuclídeo  $^{228}\text{Ra}$  foi verificado o valor mínimo para o caule da Cana do Brejo (*Costus spicatus*) e o valor máximo é referente a folha de Orquídea (*Phalaenopsis hybrido*).

Os valores relativos ao MDA do radionuclídeo  $^{228}\text{Th}$  foi verificado o valor mínimo para o caule de Pitanga (*Eugenia uniflora*), enquanto o valor máximo é referente a folha de Hortelã (*Mentha piperita*).

#### **4.1.1. Concentração de atividades de $^{40}\text{K}$ nas amostras de plantas medicinais e ornamentais**

Os valores encontrados relativos às concentrações das atividades para o  $^{40}\text{K}$  variaram entre o menor valor ( $29,41 \pm 9,85 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) para a poupa de Alho (*Allium sativum*) e o maior valor ( $921,72 \pm 45,87 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) para o caule de Copo de Leite (*Zantedeschia aethiopica*).

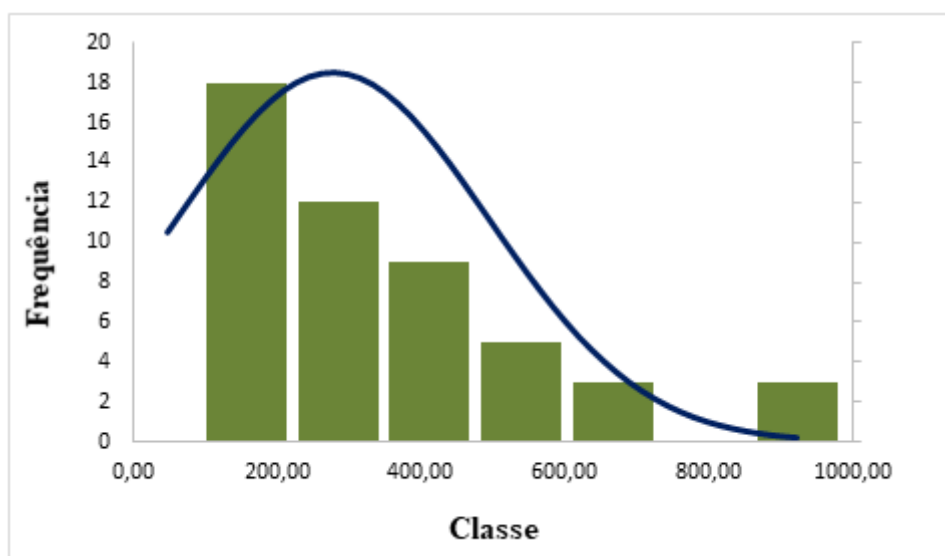
A média das concentrações de atividades para o  $^{40}\text{K}$  encontradas neste estudo resultaram em ( $276,94 \pm 20,64 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Podemos destacar o caule e a folha do copo de leite que apresentam respectivamente a maior e a terceira maior concentração entre as amostras analisadas, tendo a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*) apresentado a segunda maior concentração. Entre os valores superiores à média, temos a folha de Babosa (*Aloe vera*) com a menor concentração ( $279,92 \pm 16,65 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ).

Seis (10,91%) amostras apresentam concentração apenas de  $^{40}\text{K}$ , são elas: Alho (*Allium sativum*) poupa, Orquídea (*Phalaenopsis hybrido*) folha, Limão Galego (*Citrus aurantifolia*) poupa, Girassol (*Helianthus annuus L.*) semente e Cana do Brejo (*Costus spicatus*) caule e folha.

Os valores médios de concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  nas amostras de plantas medicinais e ornamentais apresentaram valores superiores aos dos radionuclídeos

naturais das séries do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . Entretanto, era de se esperar, pois o  $^{40}\text{K}$  é um isótopo do elemento K, um nutriente indispensável ao processo metabólico das plantas. Outro fator importante, é a adição de potássio aos solos através dos fertilizantes podendo aumentar as concentrações de potássio nas plantas (UNSCEAR, 2000).

É importante destacar que o potássio, assim como seu isótopo radioativo, o  $^{40}\text{K}$ , mantém um equilíbrio homeostático no organismo, de modo que sua assimilação ou retenção não depende exclusivamente da quantidade ingerida inicialmente (BIRAL, 2002). A figura 30 traz a distribuição em classes das faixas de concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  para as cinquenta amostras analisadas neste estudo, ressaltando que cinco amostras apresentaram valores abaixo do MDA. O caule da Amora (*Morus nigra*), a folha de Louro (*Laurus nobilis L.*), a folha de Manjerona (*Origanum majorana*) e os caules das Orquídea 1 e Orquídea 2 (*Phalaenopsis hybrido*).



**Figura 30:** Distribuição em classes das faixas de concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  nas amostras de plantas medicinais e ornamentais.

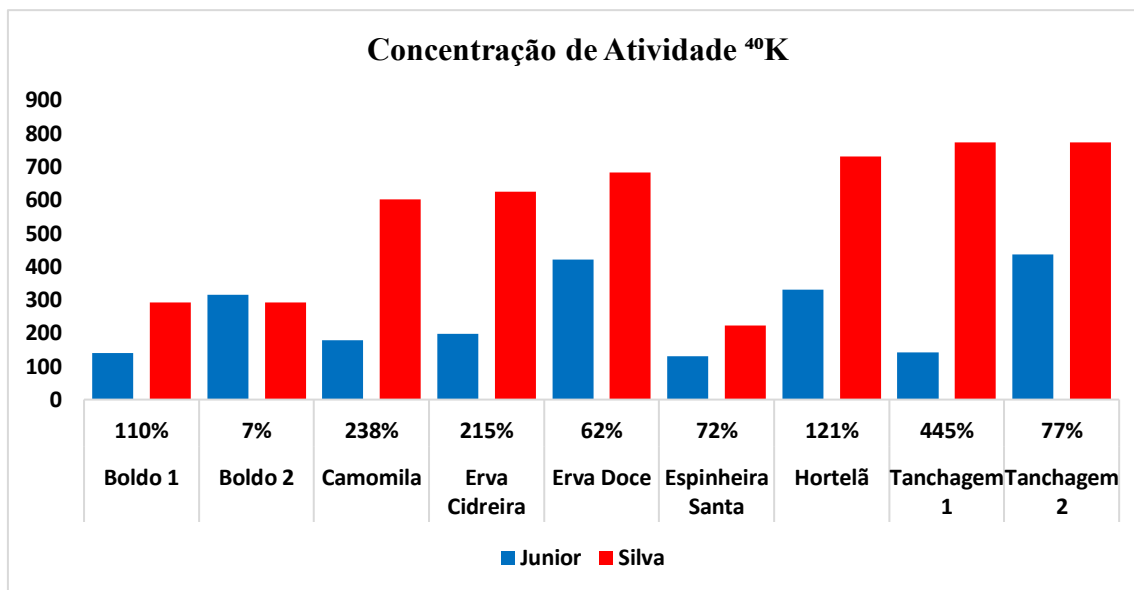
O histograma apresenta a distribuição das cinquenta amostras em sete classes, as quais abrangem a faixa de concentração da atividade. A determinação do número de classes foi realizada por meio do cálculo da raiz quadrada do total de amostras. Esse valor deve corresponder a um número inteiro, caso contrário deve ser estabelecido o inteiro mais próximo. Para caracterizar a faixa que representa cada intervalo de concentração de

atividade, foi calculado a amplitude, ou seja, a diferença entre o valor máximo e o mínimo. Logo após foi efetuado a divisão da amplitude pelo número de classes estabelecida.

A primeira classe compreende os valores menores ou igual a 156,88 Bq.kg<sup>-1</sup>, resultando em 18 estruturas neste intervalo. Já a segunda classe tem valores superiores a 156,88 Bq.kg<sup>-1</sup> e igual ou inferiores a 284,36 Bq.kg<sup>-1</sup>, com 12 amostras correspondentes a esta faixa. A terceira classe tem valores superiores a 284,36 Bq.kg<sup>-1</sup> e igual ou inferiores a 411,83 Bq.kg<sup>-1</sup>, contando com 9 estruturas nesta faixa. Para a quarta classe os valores correspondentes são superiores a 411,83 Bq.kg<sup>-1</sup> e igual ou inferiores a 539,30 Bq.kg<sup>-1</sup>, e dispõe de 5 amostras referentes a este intervalo. Valores superiores a 539,30 Bq.kg<sup>-1</sup> e igual ou menor a 666,77 Bq.kg<sup>-1</sup>, pertencem a quinta classe com 3 estruturas botânicas. A sexta classe que compreende valores superiores a 666,77 Bq.kg<sup>-1</sup> e menores que 794,25 Bq.kg<sup>-1</sup> inclusive, não apresentaram nenhuma amostra. Por fim, a sétima classe compõe valores superiores a 794,25 Bq.kg<sup>-1</sup> e igual ou inferiores a 921,72 Bq.kg<sup>-1</sup>, e apresentam 3 amostras para esta faixa.

Há poucos dados disponíveis na literatura sobre a radioatividade natural em amostras de plantas medicinais e ornamentais. Para comparação dos resultados, entre as cinquenta e cinco amostras analisadas, a literatura apresenta somente dados sobre as concentrações de atividades para o <sup>40</sup>K referentes as plantas medicinais.

Podemos então, comparar os resultados obtidos nesse estudo com SILVA,2018 relativo as seguintes plantas e estruturas botânicas: folhas de boldo (*Plectranthus barbatus*), flores de camomila (*Matricaria recutita* L), folhas de erva-cidreira (*Melissa officinalis* L.), sementes de erva-doce (*Pimpinella anisum*), folhas de espinheira-santa (*Maytenus ilicifolia*), folhas de hortelã (*Mentha piperita*) e folhas e galhos de Tanchagem (*Plantago major*). Na figura 31 está distribuída a concentração de atividade do <sup>40</sup>K nas partes das plantas analisadas para comparação com SILVA, 2018 bem como a diferença percentual.



**Figura 31:** Concentração de atividade  $^{40}\text{K}$  nas estruturas botânicas das plantas analisadas para comparação e a diferença percentual.

No estudo de SILVA, 2018 a concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  encontrada na folha de Boldo (*Plectranthus barbatus*) foi de  $(293,00 \pm 13,00 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . Já neste estudo, o valor para concentração de atividade relativa a folha Boldo 1 é  $(139,47 \pm 14,69 \text{ Bq.kg}^{-1})$ , enquanto para o Boldo 2 é  $(314,72 \pm 30,26 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . A diferença encontrada ao valor apresentado por SILVA, 2018 para o Boldo 1 é cerca de 110,08%. Já para o Boldo 2, os valores encontrados estão próximos e diferem apenas 7,41%.

A concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  na flor de Camomila (*Matricaria recutita* L.) encontrada por SILVA, 2018 é  $(603,00 \pm 23,00 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . Já o valor analisado neste estudo é de  $(178,53 \pm 15,79 \text{ Bq.kg}^{-1})$ , os valores diferem cerca de 237,76%.

Na folha de Erva Cidreira (*Melissa officinalis* L.) foi encontrado um valor de  $(625,00 \pm 29,00 \text{ Bq.kg}^{-1})$  referente a concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  na análise de SILVA, 2018, enquanto este estudo foi encontrado um valor de  $(198,13 \pm 18,23 \text{ Bq.kg}^{-1})$  para a estrutura caule. Os valores diferem cerca de 215,45%, neste caso, a alta variação pode ter relação com as diferentes formas de absorção das estruturas botânicas das plantas, visto que foi comparado plantas iguais, porém estruturas distintas, logo este fato deve ser levado em consideração.

A semente e folhas de Erva Doce apresenta uma concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  de  $(683,00 \pm 29,00 \text{ Bq.kg}^{-1})$  na análise de SILVA,2018, entretanto neste estudo o valor encontrado foi de  $(421,96 \pm 24,37 \text{ Bq.kg}^{-1})$  para a semente de Erva Doce. Os valores diferem cerca de 61,86%, vale ressaltar que não foi comparado as mesmas estruturas e sim plantas iguais Erva Doce (*Pimpinella anisum*).

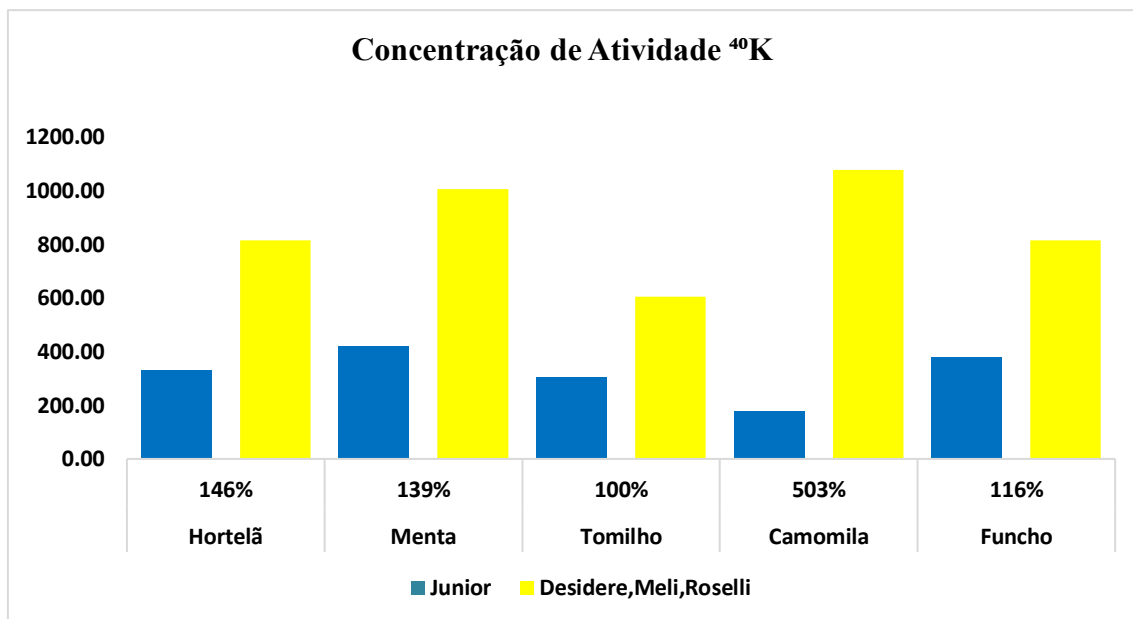
Na folha de Espinheira Santa (*Maytenus ilicifolia*) a concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  encontrada por SILVA,2018, é  $(223,00 \pm 12,00 \text{ Bq.kg}^{-1})$ , enquanto para este estudo é de  $(129,51 \pm 13,77 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . A diferença entre os valores é de aproximadamente 72,19%.

A folha de Hortelã (*Mentha piperita*) apresenta uma concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  de  $(732,00 \pm 30,00 \text{ Bq.kg}^{-1})$  na análise de SILVA,2018, enquanto para este estudo o valor observado foi  $(330,70 \pm 30,60 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . Os valores diferem em 121,35%.

As folhas e galhos de Tanchagem (*Plantago major*) apresenta uma concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  de  $(774,00 \pm 35,00 \text{ Bq.kg}^{-1})$  na análise de SILVA,2018, contudo neste presente estudo o valor encontrado foi de  $(142,02 \pm 18,76 \text{ Bq.kg}^{-1})$  e  $(437,22 \pm 26,91 \text{ Bq.kg}^{-1})$  referentes a folha de Tanchagem 1 e folha de Tanchagem 2 respectivamente. Os valores diferem cerca de 444,99% relativo a folha de Tanchagem 1 e 77,03% em relação a folha de Tanchagem 2. Vale ressaltar que não foi comparado as mesmas estruturas e sim plantas iguais Tanchagem (*Plantago major*).

No trabalho desenvolvido por DESIDERE, MELI, ROSELLI, 2010, com plantas medicinais na Itália, podemos comparar as atividades para o  $^{40}\text{K}$  das seguintes plantas: folhas de hortelã-pimenta, folhas menta, folhas tomilho, flores camomila e sementes de funcho. Na figura 32 está distribuída a concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  nas partes das plantas analisadas para comparação com DESIDERE, MELI, ROSELLI, 2010, bem como a diferença percentual.





**Figura 32:** Concentração de atividade  $^{40}\text{K}$  nas estruturas botânicas das plantas analisadas para comparação e a diferença percentual.

A concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  encontrada na folha de Hortelã- Pimenta (*Mentha piperita*) foi de (814,00 Bq.kg<sup>-1</sup>), segundo a análise de DESIDERE, MELI, ROSELLI, 2010. Já neste estudo foi encontrado um valor de (330,70 ± 30,60 Bq.kg<sup>-1</sup>) para a mesma estrutura botânica. Os valores diferem aproximadamente 146,14%.

Na folha de Menta (*Mentha spicata*) foi encontrado um valor de (1006,00 Bq.kg<sup>-1</sup>) referente a concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  na análise de DESIDERE, MELI, ROSELLI, 2010, enquanto no presente trabalho foi encontrado um valor de (420,51 ± 25,36 Bq.kg<sup>-1</sup>) para mesma estrutura botânica. Os valores apresentam uma diferença de 139,23%.

Já a folha de Tomilho selvagem (*Thymus serpyllum L.*) a concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  encontrada por DESIDERE, MELI, ROSELLI, 2010 é (605,00 Bq.kg<sup>-1</sup>), enquanto para este estudo é (302,07 ± 22,85 Bq.kg<sup>-1</sup>) referente a outro tipo de Tomilho (*Thymus vulgaris*), entretanto ambos fazem parte da mesma família Lamiaceae e diferem cerca de 100,28%.

Na flor de Camomila (*Matricaria recutita* L) a concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  encontrada por DESIDERE, MELI, ROSELLI, 2010 é (1077,00 Bq.kg $^{-1}$ ), enquanto para este estudo é (178,53  $\pm$  15,79 Bq.kg $^{-1}$ ). A diferença entre os valores é de 503,26%.

A semente de funcho apresenta uma concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  de (965,00 Bq.kg $^{-1}$ ) na análise de DESIDERE, MELI, ROSELLI, 2010, entretanto neste presente estudo o valor encontrado foi de (376,72  $\pm$  21,04 Bq.kg $^{-1}$ ) para a folha de funcho. Os valores diferem cerca de 156,16%, vale ressaltar que não foi comparado as mesmas estruturas e sim plantas iguais Funcho (*Foeniculum vulgare*).

Os resultados evidenciam uma variação significativa na concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  entre os diversos tipos de plantas medicinais. No entanto, o consumo de qualquer planta analisada neste estudo não representa risco à saúde, pois conforme mencionado anteriormente o  $^{40}\text{K}$  no organismo comporta-se de maneira semelhante ao potássio estável, um nutriente essencial, distribuindo-se uniformemente nos tecidos musculares e mantendo sua concentração constante devido ao equilíbrio homeostático (UNSCEAR, 2000).

As diferenças encontradas podem estar relacionadas a diversos fatores, entre eles, diferença de locais onde foram coletadas as plantas, altitude, índices pluviométricos, estrutura dos solos, taxa de transferência dos radionuclídeos para as diferentes estruturas botânicas, massa das amostras, entre outros.

#### **4.1.2. Concentração de atividades dos radionuclídeos $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Th}$ nas amostras de plantas medicinais e ornamentais**

Para as amostras analisadas referente ao  $^{226}\text{Ra}$ , a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*), apresenta a maior concentração de atividade (6,08  $\pm$  1,02 Bq.kg $^{-1}$ ), enquanto a folha de Babosa (*Aloe vera*), apresenta o menor valor (1,02  $\pm$  0,60 Bq.kg $^{-1}$ ).

A média das concentrações de atividades encontradas para o  $^{226}\text{Ra}$  resultaram em (2,87  $\pm$  0,96 Bq.kg $^{-1}$ ), dentre as amostras analisadas, onze (40,74%) apresentam concentração de atividade superior à média. Entre os valores superiores à média, temos a

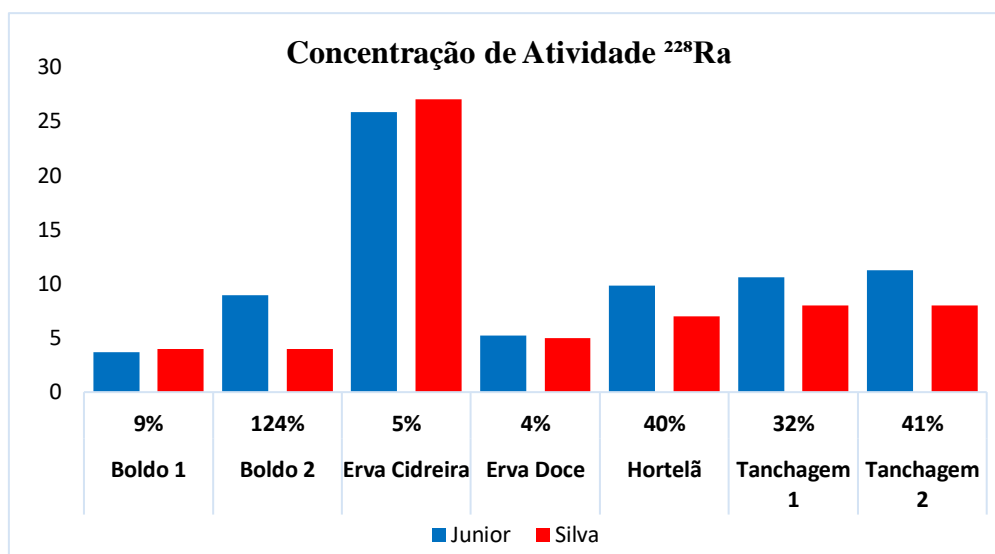
folha de Tanchagem 2 (*Plantago major*) apresentando o menor valor ( $3,10 \pm 1,04$  Bq.kg<sup>-1</sup>).

Ao comparar os resultados da concentração de atividade obtido por SILVA, 2018 verificou-se que, em quatro plantas medicinais não foram detectados valores mensuráveis para o <sup>226</sup>Ra, entretanto foi encontrado valores abaixo do MDA para três plantas, Espinheira Santa (*Maytenus ilicifolia*), Camomila (*Matricaria recutita* L.) e Erva Cidreira (*Melissa officinalis* L.).

Já as amostras analisadas referentes ao <sup>228</sup>Ra, o caule de Erva Cidreira (*Melissa officinalis* L.), apresenta a maior concentração de atividade ( $25,83 \pm 0,80$  Bq.kg<sup>-1</sup>), enquanto o caule de Pitanga (*Eugenia uniflora*) apresenta o menor valor ( $1,60 \pm 0,37$  Bq.kg<sup>-1</sup>).

A média das concentrações de atividades encontradas para o <sup>228</sup>Ra resultaram em ( $6,82 \pm 0,66$  Bq.kg<sup>-1</sup>). Dentre as amostras analisadas, dezoito (40,91%) apresentam concentração de atividade superior à média. Entre os valores superiores à média, temos o caule de Amora (*Morus nigra*) apresentando o menor valor ( $7,05 \pm 0,75$  Bq.kg<sup>-1</sup>).

Ao comparar a concentração de atividade do <sup>228</sup>Ra relatada na pesquisa de SILVA, 2018, verificou-se que duas plantas medicinais não apresentaram valores mensuráveis, todavia para as outras cinco plantas foram encontrados valores acima do MDA. Vale ressaltar que para Erva Cidreira (*Melissa officinalis* L.) não foi comparado as mesmas estruturas botânicas, mas sim plantas iguais. Na figura 33 está distribuída a concentração de atividade do <sup>228</sup>Ra nas partes das plantas analisadas para comparação com SILVA, 2018 bem como a diferença percentual.



**Figura 33:** Concentração de atividade  $^{228}\text{Ra}$  nas estruturas botânicas das plantas analisadas para comparação e a diferença percentual.

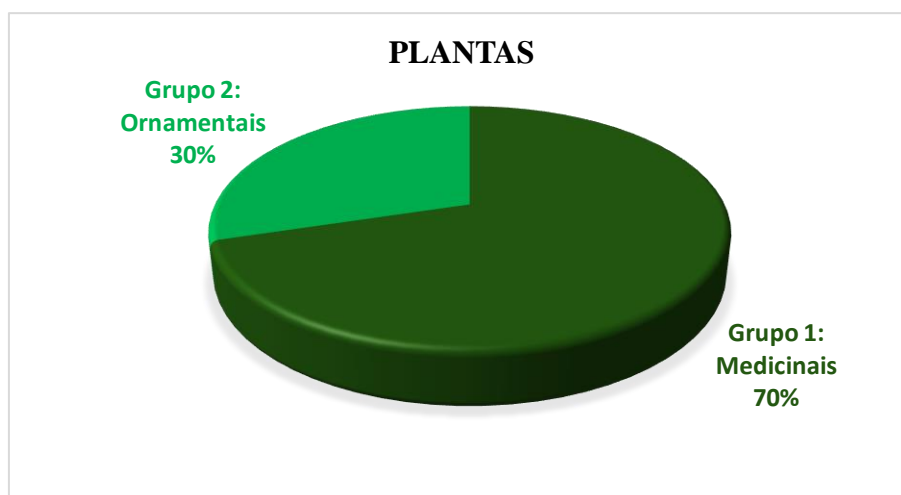
Para as amostras analisadas referente ao  $^{228}\text{Th}$ , o caule de Erva Cidreira (*Melissa officinalis* L.), apresenta a maior concentração de atividade ( $10,65 \pm 1,66 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), enquanto a flor de Camomila (*Matricaria recutita* L.), apresenta o menor valor ( $1,02 \pm 0,98 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ).

A média das concentrações de atividades encontradas para o  $^{228}\text{Th}$  resultaram em ( $3,23 \pm 1,20 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Dentre as amostras analisadas, quatorze (41,18%) apresentam concentração de atividade superior à média. Entre os valores superiores à média, temos a folha de Copo de Leite (*Zantedeschia aethiopica*), apresentando o menor valor ( $3,29 \pm 1,25 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ).

#### 4.1.3. Análise das Concentrações de atividades dos radionuclídeos divididos em grupos de plantas medicinais e ornamentais

Dentre as cinquenta e cinco amostras analisadas, temos um total de trinta e sete plantas medicinais e ornamentais que foram subdivididas em dois diferentes grupos e a figura 34 representa a divisão em percentual do grupo 1 e grupo 2.

- **Grupo 1: Plantas Medicinais**
- **Grupo 2: Plantas Ornamentais**



**Figura 34:** Divisão percentual do grupo 1 e grupo 2.

O grupo 1 é responsável por vinte e seis plantas e trinta e cinco estruturas botânicas, enquanto o grupo 2 é representado por onze plantas e vinte estruturas botânicas. A figura 35 mostra o percentual das estruturas botânicas referentes a cada grupo.



**Figura 35:** Divisão percentual das estruturas botânicas do grupo 1 e grupo 2.

A tabela 12: mostra a concentração de atividade total dos radionuclídeos nas cinquenta e cinco amostras de plantas medicinais e ornamentais analisadas em cada grupo.

**Tabela 12:** Análise quantitativa das doses relativas a cada grupo.

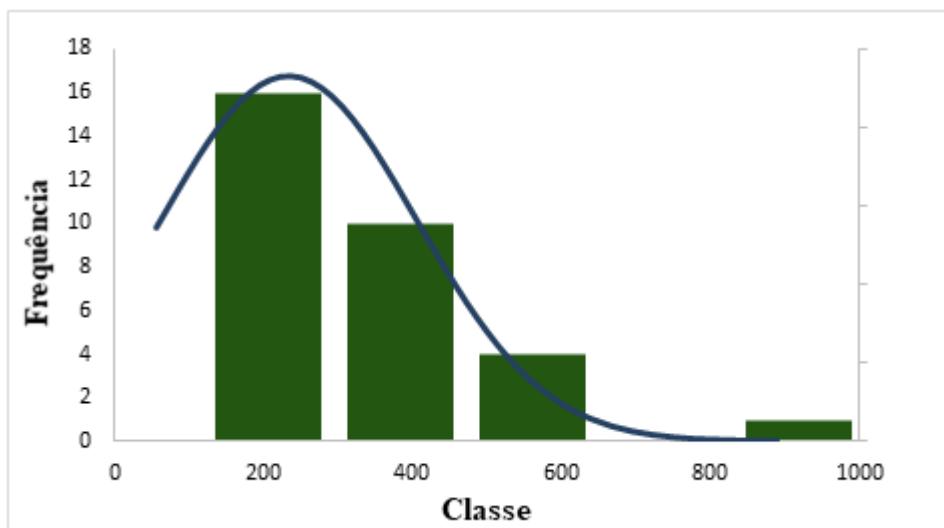
| Radionuclídeos    | Grupos | Atividade ( Bq.kg <sup>1</sup> ) | Percentual |
|-------------------|--------|----------------------------------|------------|
| <sup>40</sup> K   | 1      | 7516,78                          | 54,28%     |
|                   | 2      | 6330,38                          | 45,72%     |
| <sup>226</sup> Ra | 1      | 48,33                            | 62,40%     |
|                   | 2      | 29,12                            | 37,60%     |
| <sup>228</sup> Ra | 1      | 186,83                           | 62,25%     |
|                   | 2      | 113,32                           | 37,75%     |
| <sup>228</sup> Th | 1      | 75,87                            | 69,15%     |
|                   | 2      | 33,85                            | 30,85%     |

O maior valor da concentração de atividade de <sup>40</sup> K relativo ao grupo 1 se deve a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*) (918,21 ± 44,03 Bq.kg<sup>-1</sup>), enquanto no grupo 2 se deve ao caule de Copo de Leite (*Zantedeschia aethiopica*) (921,72 ± 45,87 Bq.kg<sup>-1</sup>), este último apresenta também o maior valor global. Nota-se que os valores encontrados estão bem próximos e diferem apenas 0,38%.

Por outro lado, o menor valor encontrado para a concentração de atividade de <sup>40</sup> K relativo ao grupo 1 se deve a poupa de Alho (*Allium sativum*) (29,41 ± 9,85 Bq.kg<sup>-1</sup>), enquanto no grupo 2 se deve ao caule de Bromélia (*Bromelia antiacantha bertol*) (38,89 ± 13,47 Bq.kg<sup>-1</sup>), e diferem em 32,23%.

A média das concentrações de atividades encontradas para o grupo 1 resultaram em (234,90 ± 18,86 Bq.kg<sup>-1</sup>). Dentre as amostras do grupo 1 analisadas, treze (40,63%) apresentam concentração de atividade superior à média. Entre os valores superiores à média, temos a poupa de Gengibre (*Zingiber officinale roscoe*), apresentando o menor valor (237,43 ± 17,51 Bq.kg<sup>-1</sup>). Comparando a média global das 55 amostras com a média aferida no grupo 1 a diferença é aproximadamente 17,90%. Já a média das concentrações de atividades encontradas para o grupo 2 resultaram em (340,42 ± 23,79 Bq.kg<sup>-1</sup>), valor este superior 44,92% à média do grupo 1 e superior 22,92% relativo à média global.

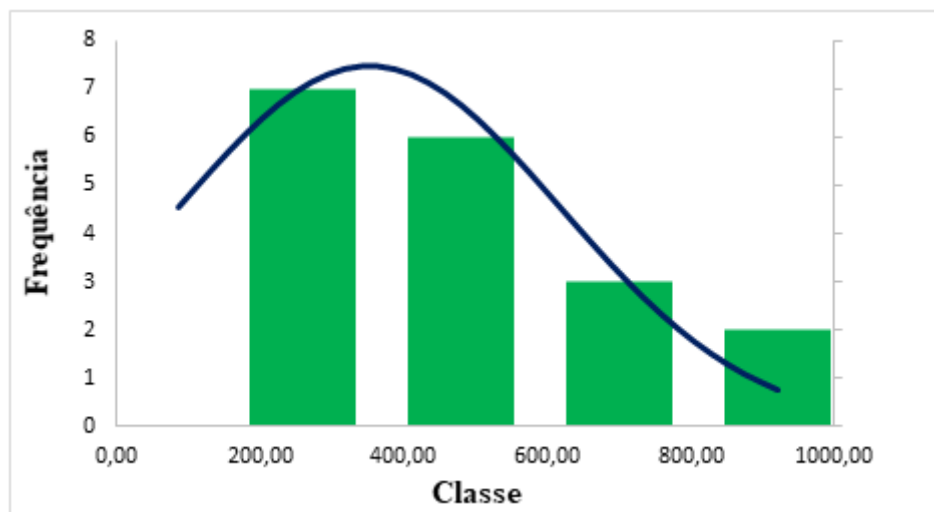
Dentre as amostras do grupo 2 analisadas, nove (47,37%) apresentam concentração de atividade superior à média. Entre os valores superiores à média, temos a folha de Hibisco (*Hibiscus sabdariffa*), apresentando o menor valor ( $373,98 \pm 20,82 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). A figura 36 traz a distribuição em classes das faixas de concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  para as 32 amostras de plantas medicinais analisadas neste estudo.



**Figura 36:** Distribuição em classes das faixas de concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  nas amostras de plantas medicinais.

A distribuição das 32 estruturas botânicas medicinais está representada no histograma e divide as concentrações de atividade do  $^{40}\text{K}$  em 5 classes. Utilizando da mesma metodologia descrita anteriormente, foi analisado o conjunto de dados referentes ao grupo 1. Observou-se 17 amostras para a faixa que corresponde valores menores ou igual a  $207,17 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , está é a primeira classe. Já a segunda classe tem valores compreendidos entre  $207,17 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e  $384,93 \text{ Bq.kg}^{-1}$  inclusive. Para essa faixa temos, uma contribuição de 10 amostras. A terceira classe é representada por 4 amostras e correspondem a faixa de valores superiores a  $384,93 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e iguais ou inferiores a  $562,69 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Valores superiores a  $562,69 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e iguais ou inferiores a  $740,45 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , representam a quarta classe sem nenhuma contribuição para essa faixa. A quinta classe compõe valores entre  $740,45 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e  $918,21 \text{ Bq.kg}^{-1}$  inclusive, apresentam apenas uma amostra para essa faixa. Vale ressaltar, que para esse grupo três estruturas botânicas ficaram abaixo do MDA, o caule da Amora (*Morus nigra*), a folha de Louro (*Laurus nobilis L.*) e a folha de Manjerona (*Origanum majorana*). A figura 37 traz a

distribuição em classes das faixas de concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  para as 18 amostras de plantas ornamentais analisadas neste estudo.



**Figura 37:** Distribuição em classes das faixas de concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  nas amostras de plantas ornamentais.

Já o histograma que representa a distribuição das 18 estruturas botânicas ornamentais, é dividida em 4 classes que apresentam as faixas de concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$ . Utilizando da mesma metodologia descrita no cenário anterior, foi analisado o conjunto de dados referentes ao grupo 2. A primeira classe corresponde valores inferiores ou igual a  $259,60 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , com uma contribuição de 7 estruturas botânicas. Já a segunda classe tem valores superiores a  $259,60 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e inferiores ou igual a  $480,31 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , com uma representatividade de 6 estruturas botânicas. A terceira classe, observa-se 3 estruturas botânicas que correspondem a uma faixa de valores superiores a  $480,31 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e inferiores ou igual a  $701,01 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . A quarta classe compõe valores que são superiores a  $701,01 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e inferiores ou igual a  $921,71 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e apresenta 2 contribuições. Vale lembrar, que duas estruturas botânicas ornamentais ficaram abaixo do MDA, são elas: os caules das Orquídea 1 e Orquídea 2 (*Phalaenopsis hybrido*).

A variação na concentração dos elementos decorre das particularidades na absorção por diferentes estruturas botânicas das plantas, como folhas, caule, raízes, cascas e flores, além da composição do solo onde foram cultivadas (THUNUS,1994). Além do mais, fatores como o uso de fertilizantes, as condições climáticas e a poluição industrial



também podem influenciar as variações nas concentrações específicas observadas (SILVA,2018).

O maior valor da concentração de atividade de  $^{226}\text{Ra}$  relativo ao grupo 1 se deve a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*) ( $6,08 \pm 1,02 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), que também apresenta o maior valor global para esse radionuclídeo, enquanto no grupo 2 se deve ao caule de Copo de Leite (*Zantedeschia aethiopica*) ( $5,08 \pm 1,13 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Os valores diferem 19,69% aproximadamente quando comparamos ambos os grupos.

Por outro lado, o menor valor encontrado para a concentração de atividade de  $^{226}\text{Ra}$  relativo ao grupo 1 se deve a folha de Babosa (*Aloe vera*) ( $1,02 \pm 0,60 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), que também apresenta o menor valor global, enquanto no grupo 2 se deve a folha de Comigo- Ninguém- Pode (*Dieffenbachia seguine*) ( $2,08 \pm 0,91 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), e diferem em 103,92%.

A média das concentrações de atividades encontradas para o grupo 1 resultaram em ( $2,84 \pm 0,98 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Dentre as amostras do grupo 1 analisadas, sete (41,18%) apresentam concentração de atividade superior à média. Comparando com a média global, os valores encontrados estão bem próximos e diferem apenas 1,06%. Para o grupo 2 a média das concentrações de atividades encontradas resultaram em ( $2,91 \pm 0,93 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), valores próximos ao grupo 1 e global e diferem (2,46%) e (1,39%) respectivamente.

O maior valor da concentração de atividade de  $^{228}\text{Ra}$  relativo ao grupo 1 se deve ao caule de Erva Cidreira (*Melissa officinalis L.*) ( $25,83 \pm 0,80 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), que também apresenta o maior valor global para esse radionuclídeo, enquanto no grupo 2 se deve ao caule de Hortênsia (*Hydrangea macrophylla*) ( $11,44 \pm 0,84 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Os valores diferem 125,79% aproximadamente quando comparamos ambos os grupos.

Por outro lado, o menor valor encontrado para a concentração de atividade de  $^{228}\text{Ra}$  relativo ao grupo 1 se deve ao caule de Pitanga (*Eugenia uniflora*) que representa também o menor valor global ( $1,60 \pm 0,37 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Para o grupo 2 o menor valor se deve ao caule de Equinácea-de-Folha-Cortada (*Rudbeckia laciniata*) ( $3,27 \pm 0,69 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), e diferem em 104,38%.

A média das concentrações de atividades encontradas para o grupo 1 resultaram em  $(6,67 \pm 0,65 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . Dentre as amostras do grupo 1 analisadas, dez (35,71%) apresentam concentração de atividade superior à média. Comparando com a média global, os valores encontrados da média aferida no grupo 1 estão bem próximos e resulta em uma pequena diferença de aproximadamente (2,25%). Já a média das concentrações de atividades encontradas para o grupo 2 resultaram em  $(7,08 \pm 0,67 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . O valor é superior cerca de 6,15% à média do grupo 1 e superior cerca de 3,81% a média global. Dentre as amostras do grupo 2 analisadas, oito (50%) apresentam concentração de atividade superior à média.

O maior valor da concentração de atividade de  $^{228}\text{Th}$  relativo ao grupo 1 se deve ao caule de Erva Cidreira (*Melissa officinalis L.*)  $(10,65 \pm 1,66 \text{ Bq.kg}^{-1})$ , que também apresenta o maior valor global para esse radionuclídeo, enquanto no grupo 2 se deve ao caule de Hortênsia (*Hydrangea macrophylla*)  $(6,02 \pm 1,97 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . Os valores encontrados diferem 76,91%.

Por outro lado, o menor valor encontrado para a concentração de atividade de  $^{228}\text{Th}$  relativo ao grupo 1 se deve a flor de Camomila (*Matricaria recutita L.*)  $(1,02 \pm 0,98 \text{ Bq.kg}^{-1})$  que também possui o menor valor global. Para o grupo 2 o menor valor encontrado se deve a folha de Hibisco (*Hibiscus sabdariffa*)  $(1,12 \pm 0,83 \text{ Bq.kg}^{-1})$ , e diferem em 9,80%.

A média das concentrações de atividades encontradas para o grupo 1 resultaram em  $(3,45 \pm 1,22 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . Dentre as amostras do grupo 1 analisadas, oito (36,36%) apresentam concentração de atividade superior à média. Fazendo uma comparação da média global, com a aferida no grupo 1 resulta em uma diferença de cerca de 6,81%. A média das concentrações de atividades encontradas para o grupo 2 resultaram em  $(2,82 \pm 1,18 \text{ Bq.kg}^{-1})$ . O valor é inferior cerca de 18,26% à média do grupo 1 e inferior cerca de 12,69% a média global. Dentre as amostras do grupo 2 analisadas, seis (50%) apresentam concentração de atividade superior à média.

A distribuição das plantas medicinais e ornamentais quanto a suas respectivas famílias apresentam uma variedade de 24 famílias e dentre elas se destaca as seguintes famílias. Lamiaceae, com a contribuição de 8 plantas, todas classificadas como medicinais, alecrim (*Rosmarinus officinalis*), erva cidreira (*Melissa officinalis L.*), hortelã

(*Mentha piperita*), Manjerona (*Origanum majorana*), menta (*Mentha spicata*), boldo (*Plectranthus barbatus*), sálvia (*Salvia officinalis*) e tomilho (*Thymus vulgaris*). A família Asteraceae vem logo depois com uma contribuição de 4 plantas, sendo 3 classificadas como medicinais, camomila (*Matricaria recutita* L.), girassol (*Helianthus annuus* L.), stévia (*Stevia rebaudiana*) e 1 como ornamental equinácea-de-folha-cortada (*Rudbeckia laciniata*). A família Araceae contribui com 3 plantas, todas classificadas como ornamentais, antúrio (*Anthurium andraeanum*), comigo ninguém pode (*Dieffenbachia seguine*) e copo de leite (*Zantedeschia aethiopica*). A família Myrtaceae contribui com 2 plantas, classificadas como medicinais, eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e pitanga (*Eugenia uniflora*). A família Apiaceae, também contribui com 2 plantas, classificadas como medicinais, erva doce (*Pimpinella anisum*) e funcho (*Foeniculum vulgaris* L.). Todas as demais famílias contribuem com apenas uma planta.

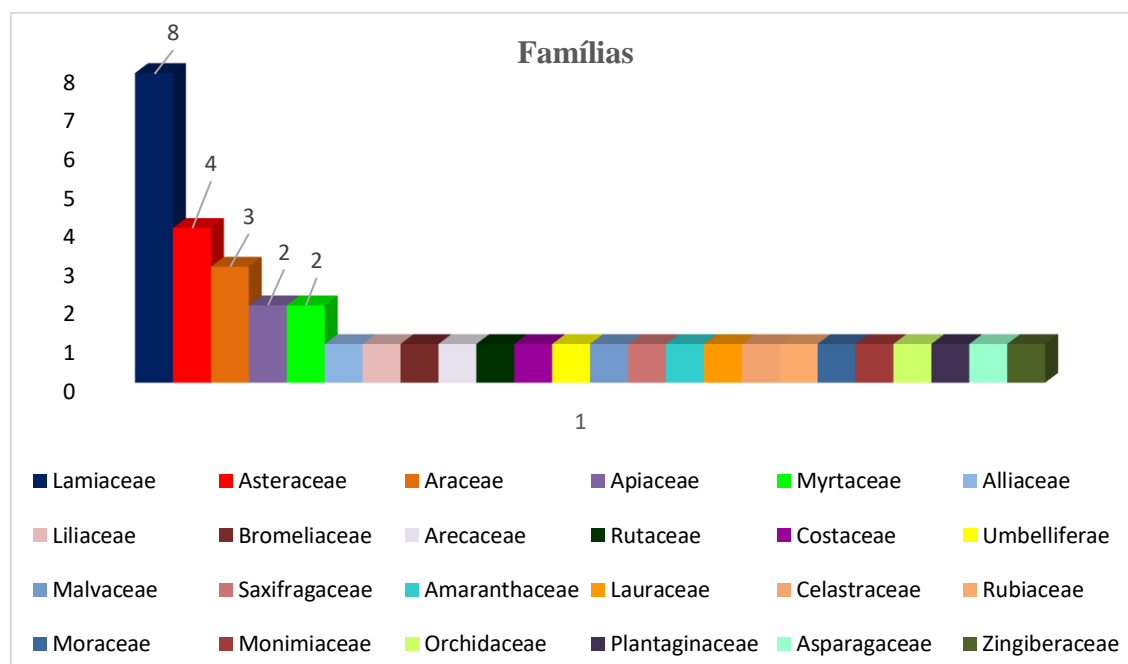
Na família Lamiaceae o caule de Boldo é o que apresenta o menor valor de concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  ( $43,82 \pm 11,86 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), enquanto o maior valor é referente a folha de menta ( $420,51 \pm 25,36 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) e diferem em 859,63%. A Manjerona ficou abaixo do MDA e a média encontrada foi de ( $252,98 \pm 21,42 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Das oito plantas, temos dez estruturas botânicas dentre as quais cinco tiveram valores superior à média, ou seja 50% das estruturas.

A família Asteraceae, a semente de Girassol é a que apresenta o menor valor ( $48,29 \pm 10,15 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) para a concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$ , e folha de equinácea-de-folha-cortada é a que obteve o maior valor ( $281,01 \pm 21,64 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) e diferem 481,92%. A média encontrada foi de ( $181,12 \pm 15,84 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) para um conjunto de quatro plantas e seis estruturas botânicas, onde 3 estruturas apresentaram valores superiores à média, ou seja 50%.

Para a família Araceae, temos o caule de Antúrio apresentando o menor valor referente a concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$  ( $41,97 \pm 8,84 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), enquanto o maior valor se deve ao caule de Copo de Leite ( $921,72 \pm 45,87 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). A diferença equivale a 2096,14%. Vale ressaltar, que o caule do Copo de Leite é responsável também pelo maior valor global. A média obtida foi de ( $593,26 \pm 32,52 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Está é a maior média referente a todas as famílias analisadas nessa pesquisa. Dentre as três plantas e as cinco estruturas analisadas, o caule e a folha de Copo de Leite são responsáveis pelas duas estruturas superiores à média, todas as outras estruturas estão abaixo da média.

Já para a família Myrtaceae a folha de Eucalipto apresenta o menor valor ( $100,58 \pm 10,77 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), enquanto o caule de Pitanga obteve o maior valor ( $209,27 \pm 12,46 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) relativo a concentração de atividade para o  $^{40}\text{K}$ . Os valores diferem em 108%. A média aferida para as três estruturas das duas plantas foi de ( $158,32 \pm 13,43 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Dentre as três estruturas, duas apresentaram valores superiores à média.

A família Apiaceae a folha de Funcho apresenta o menor valor ( $376,72 \pm 21,04 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) para a concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$ , enquanto o maior valor se deve a semente de Erva Doce ( $421,96 \pm 24,37 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) e os valores diferem em 12%. A média encontrada é ( $399,34 \pm 22,71 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) para as duas plantas e as duas estruturas. A figura 38 apresenta as plantas medicinais e ornamentais classificada em suas respectivas famílias.



**Figura 38:** Famílias das plantas medicinais e ornamentais.

#### 4.2. Cálculos de Dose Efetiva

A Tabela 13 apresenta a dose efetiva referente aos radionuclídeos das 35 amostras de plantas medicinais analisadas nesse estudo. Para o cálculo de dose efetiva, foi estimado que uma pessoa consome em média  $1 \text{ kg.ano}^{-1}$  de plantas medicinais (SILVA,2018).

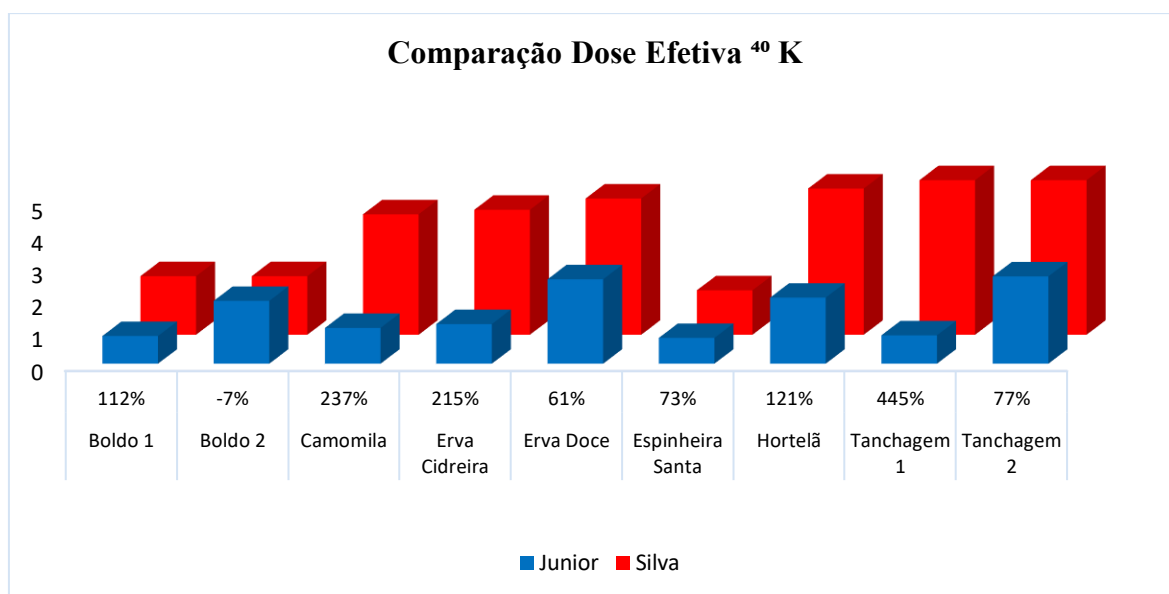
**Tabela 13:** Cálculo de Dose Efetiva ( $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ )

| <b>Plantas</b>   | <b>Parte</b> | <b><math>^{40}\text{K}</math></b> | <b><math>^{226}\text{Ra}</math></b> | <b><math>^{228}\text{Ra}</math></b> | <b><math>^{228}\text{Th}</math></b> |
|------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Alecrim          | Folha        | 1,41                              | 0,07                                | 0,29                                | $7,60 \cdot 10^{-5}$                |
| Alho             | Poupa        | 0,18                              | 0,08                                | 0,30                                | $3,71 \cdot 10^{-5}$                |
| Amora            | Folha        | 2,58                              | 0,15                                | 0,99                                | $5,72 \cdot 10^{-5}$                |
| Amora            | Caule        | 0,17                              | 0,11                                | 0,97                                | $1,54 \cdot 10^{-4}$                |
| Babosa           | Folha        | 1,74                              | 0,06                                | 0,58                                | $9,40 \cdot 10^{-5}$                |
| Boldo do Chile   | Folha        | 5,69                              | 0,34                                | 2,57                                | $2,77 \cdot 10^{-4}$                |
| Boldo 1          | Folha        | 0,86                              | 0,09                                | 0,51                                | $1,22 \cdot 10^{-4}$                |
| Boldo            | Caule        | 0,27                              | 0,23                                | 0,66                                | $6,16 \cdot 10^{-5}$                |
| Boldo 2          | Folha        | 1,95                              | 0,27                                | 1,24                                | $1,40 \cdot 10^{-4}$                |
| Camomila         | Flor         | 1,11                              | 0,08                                | 0,47                                | $3,67 \cdot 10^{-5}$                |
| Cana do Brejo    | Folha        | 0,84                              | 0,14                                | 0,53                                | $6,55 \cdot 10^{-5}$                |
| Cana do Brejo    | Caule        | 0,46                              | 0,05                                | 0,20                                | $2,48 \cdot 10^{-5}$                |
| Erva Cidreira    | Caule        | 1,23                              | 0,26                                | 3,56                                | $3,83 \cdot 10^{-4}$                |
| Erva Doce        | Semente      | 2,62                              | 0,07                                | 0,72                                | $3,46 \cdot 10^{-5}$                |
| Espinheira Santa | Folha        | 0,80                              | 0,08                                | 0,60                                | $5,36 \cdot 10^{-5}$                |
| Espinheira Santa | Caule        | 0,76                              | 0,09                                | 0,36                                | $5,51 \cdot 10^{-5}$                |
| Eucalipto        | Folha        | 0,62                              | 0,06                                | 0,81                                | $1,05 \cdot 10^{-4}$                |
| Eucalipto        | Caule        | 1,02                              | 0,22                                | 1,19                                | $2,06 \cdot 10^{-4}$                |
| Funcho           | Folha        | 2,34                              | 0,11                                | 0,40                                | $2,77 \cdot 10^{-5}$                |
| Gengibre         | Poupa        | 1,47                              | 0,08                                | 0,48                                | $1,21 \cdot 10^{-4}$                |
| Girassol         | Semente      | 0,30                              | 0,07                                | 0,28                                | $3,49 \cdot 10^{-5}$                |

|              |       |      |      |      |                |
|--------------|-------|------|------|------|----------------|
| Hortelã      | Folha | 2,05 | 0,16 | 1,36 | $7,63.10^{-5}$ |
| Limão Galego | Poupa | 0,85 | 0,08 | 0,30 | $3,71.10^{-5}$ |
| Louro        | Folha | 0,13 | 0,08 | 0,38 | $4,00.10^{-5}$ |
| Manjerona    | Folha | 0,09 | 0,09 | 0,66 | $7,70.10^{-5}$ |
| Menta        | Folha | 2,61 | 0,14 | 1,17 | $1,72.10^{-4}$ |
| Noni         | Folha | 0,83 | 0,07 | 0,56 | $3,38.10^{-5}$ |
| Noni         | Caule | 1,04 | 0,10 | 0,52 | $6,66.10^{-5}$ |
| Noni 2       | Folha | 0,76 | 0,14 | 0,61 | $7,74.10^{-5}$ |
| Pitanga      | Caule | 1,30 | 0,04 | 0,22 | $1,94.10^{-5}$ |
| Sálvia       | Folha | 1,86 | 0,11 | 0,42 | $1,00.10^{-4}$ |
| Stévia       | Folha | 1,58 | 0,18 | 0,48 | $1,46.10^{-4}$ |
| Tomilho      | Folha | 1,87 | 0,10 | 0,79 | $6,59.10^{-5}$ |
| Tanchagem 1  | Folha | 0,88 | 0,20 | 1,46 | $5,69.10^{-5}$ |
| Tanchagem 2  | Folha | 2,71 | 0,17 | 1,55 | $1,40.10^{-5}$ |

Para o  $^{40}\text{K}$  o maior valor aferido é de ( $5,69 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ), referente a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*), enquanto o menor valor de ( $0,09 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ), se deve a folha de Manjerona (*Origanum majorana*). A diferença entre o valor máximo e mínimo encontrado é maior que 6222%. Os valores deste estudo ficaram abaixo da média anual mundial de dose efetiva devido a ingestão de alimentos referentes a uma pessoa, cujo valor é de  $0,29 \text{ mSv.ano}^{-1}$  (UNSCEAR,2016). Alguns fatores podem ter contribuído para a diferença considerável de dose encontrada. A estrutura do solo onde foram cultivadas, pode ser um indicativo, visto que o Boldo do Chile é oriundo de Petrópolis-RJ e a Manjerona de Belo Horizonte-MG. Outro ponto é a questão do fator de transferência desses radionuclídeos.

A figura 39 compara os resultados obtidos por Silva, 2018 e este estudo da dose efetiva para o  $^{40}\text{K}$  das seguintes estruturas botânicas sobre as mesmas condições de análise, são elas: folhas de Boldo (*Plectranthus barbatus*), flor de Camomila (*Matricaria recutita* L.), folhas de Erva Cidreira (*Melissa officinalis* L.), sementes de Erva Doce (*Pimpinella anisum*), folhas de Espinheira Santa (*Maytenus ilicifolia*), folhas de Hortelã (*Mentha piperita*) e folhas de Tanchagem (*Plantago major*).



**Figura 39:** Dose efetiva para  $^{40}\text{K}$  nas estruturas botânicas para comparação e a diferença percentual.

Os valores obtidos para dose efetiva referente ao estudo conduzido por SILVA, 2018, apresentam grandes variações quando comparados com este presente estudo, entretanto o valor mais próximo obtido foi a folha de Boldo 2 que resulta em uma pequena diferença de aproximadamente 7,14%. Contudo a maior variação percentual se deve a folha de Tanchagem 1 cujo valor é de 445,45%. Vale ressaltar que para erva cidreira os valores de dose efetiva comparados neste trabalho foram de estruturas botânicas distintas e a diferença percentual encontrada foi de 215,45%.

A referência de valores recomendados pela UNSCEAR (2000) para dose efetiva anual devido à ingestão dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$  são apresentados na tabela 14. Observa-se que não há valores de referência para  $^{40}\text{K}$ , pois este, independentemente do consumo pessoal, está em equilíbrio homeostático com o

organismo, tendo o valor de dose efetiva total sugerido em  $170 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$  (UNSCEAR, 2000).

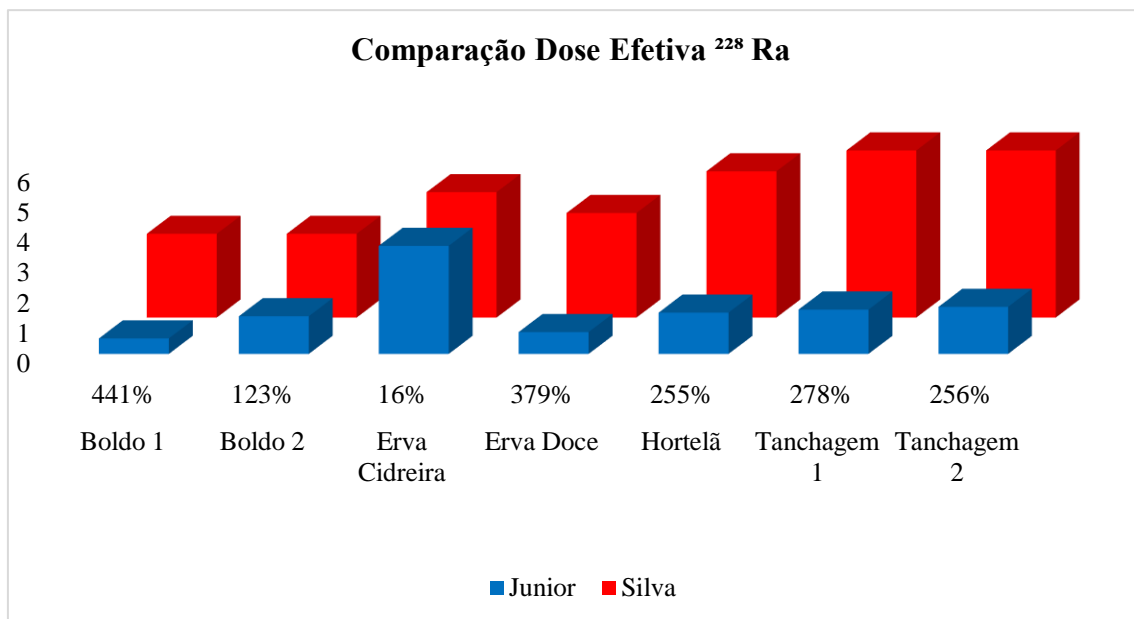
**Tabela 14:** Valores de Referência para dose efetiva (UNSCEAR, 2000).

| Radionuclídeos    | Dose efetiva ( $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) |
|-------------------|--|
| $^{226}\text{Ra}$ | 6,30                                     |
| $^{228}\text{Ra}$ | 11,00                                    |
| $^{228}\text{Th}$ | 0,22                                     |

O maior valor encontrado para o  $^{226}\text{Ra}$  é de ( $0,34 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ), referente a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*), por outro lado o menor valor de ( $0,04 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ), se deve ao caule de Pitanga (*Eugenia uniflora*). A diferença entre o valor máximo e mínimo encontrado é 750%. Todos os valores encontrados para esse radionuclídeo estão abaixo do valor médio de referência UNSCEAR. Na análise de SILVA, 2018, com exceção da camomila ( $< 3,08$ ) e da erva doce ( $< 2,24$ ) que ficaram abaixo do MDA, as demais plantas não obtiveram valores detectáveis.

O caule de erva cidreira (*Melissa officinalis L.*) ( $3,56 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) obteve o maior valor para o  $^{228}\text{Ra}$ , enquanto o caule de cana do brejo (*Costus spicatus*) ( $0,20 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) apresentou o menor valor. A diferença entre o valor máximo e mínimo para a dose efetiva referente ao  $^{228}\text{Ra}$  é 1680%. Na análise de SILVA, 2018, não registraram valores detectáveis a flor de camomila (*Matricaria recutita L*) e a folha de espinheira santa (*Maytenus ilicifolia*). A figura 40 compara os valores obtidos por SILVA, 2018, com os resultados deste estudo para dose efetiva comprometida referente ao  $^{228}\text{Ra}$ .





**Figura 40:** Dose efetiva para  $^{228}\text{Ra}$  nas estruturas botânicas para comparação e a diferença percentual.

Os valores para dose efetiva referente ao estudo conduzido por SILVA, 2018, apresentam grandes variações quando comparados a este presente estudo, entretanto o valor mais próximo obtido foi o caule de erva cidreira que resulta em uma diferença de 16%. Vale ressaltar que para Erva Cidreira (*Melissa officinalis* L.) os valores de dose efetiva comparados neste trabalho foram de estruturas botânicas distintas (caule e folha), todavia sobre plantas iguais, pertencentes a família Lamiaceae. Contudo a maior variação percentual se deve a folha de boldo 1 cujo valor é de 441%.

O caule de erva cidreira ( $3,83 \times 10^{-4} \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) apresenta o maior valor para o  $^{228}\text{Th}$ , enquanto a folha de Tanchagem 2 ( $1,40 \times 10^{-5} \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) obteve o menor valor. A diferença entre o valor máximo e mínimo para a dose efetiva referente ao  $^{228}\text{Th}$  é superior a 2635%. No estudo de SILVA, 2018, não foi determinado a concentração de atividade específica para o radionuclídeo  $^{228}\text{Th}$ , logo não foi calculado doses efetivas referentes a este radionuclídeo.

#### 4.2.1. Análise Quantitativa das Doses Efetivas

A Tabela 15 traz informação dos quatro radionuclídeos em relação à quantidade e o percentual de dose.

**Tabela 15:** Análise Quantitativa das doses efetivas ( $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ).

| Radionuclídeos    | Dose Efetiva ( $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) | Percentual |
|-------------------|--|------------|
| <sup>40</sup> K   | 46,99                                    | 59%        |
| <sup>226</sup> Ra | 4,40                                     | 6%         |
| <sup>228</sup> Ra | 28,18                                    | 35%        |
| <sup>228</sup> Th | 0,0032767                                | 0,00%      |

A maior contribuição para a dose efetiva se deve ao <sup>40</sup>K com 59%, seguida do <sup>228</sup>Ra com 35%. O <sup>228</sup>Ra por ter um alto fator de conversão para dose efetiva comprometida tem essa representatividade na dose total, onde juntamente com o <sup>40</sup>K correspondem a 94% da dose total. Os 6% restantes fica a cargo do <sup>226</sup>Ra, que de modo geral tem uma pequena representatividade, enquanto o <sup>228</sup>Th mostra-se insignificante para dose efetiva total.

#### 4.2.2. Análise Quantitativa das Doses Efetivas Acumuladas em Alguns Órgãos do Tecido Humano

Foi calculada a dose efetiva (Deft) acumulada em alguns órgãos do tecido humano e os valores encontrados estão dispostos na tabela 16.

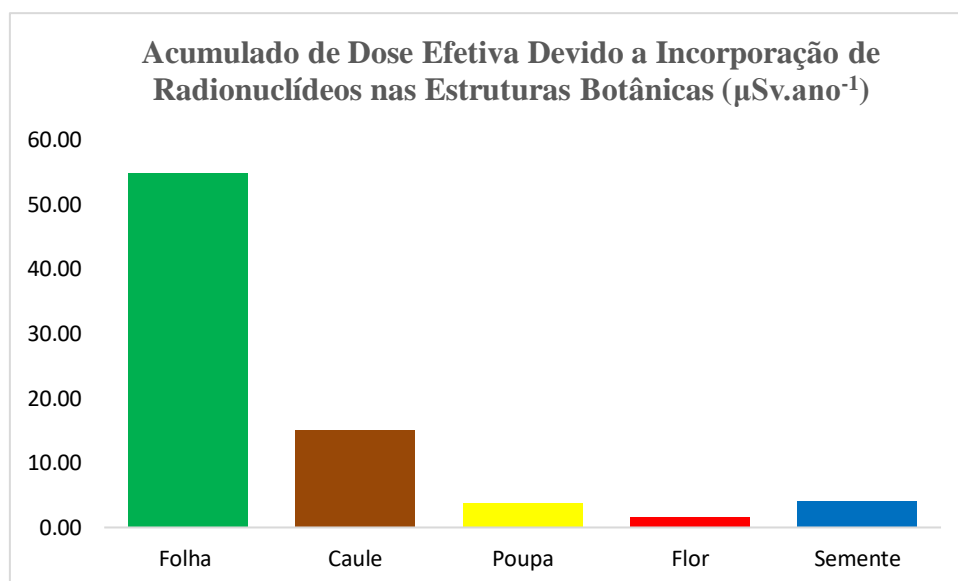
**Tabela 16:** Dose Efetiva Acumulada em Alguns Órgãos do Tecido Humano.

| Plantas | Parte | Dose Total<br>Radionuclídeos<br>( $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) | Estômago | Gônadas | Tireóide | Pele |
|---------|-------|---|----------|---------|----------|------|
| Alecrim | Folha | 1,77  | 0,40     | 0,14    | 0,07     | 0,02 |
| Alho    | Poupa | 0,56  | 0,11     | 0,04    | 0,02     | 0,01 |
| Amora   | Folha | 3,72  | 0,74     | 0,30    | 0,15     | 0,04 |
| Amora   | Caule | 1,25  | 0,25     | 0,10    | 0,05     | 0,01 |
| Babosa  | Folha | 2,38  | 0,48     | 0,19    | 0,10     | 0,02 |

|                  |         |      |      |      |      |      |
|------------------|---------|------|------|------|------|------|
| Boldo do Chile   | Folha   | 8,60 | 1,72 | 0,69 | 0,34 | 0,09 |
| Boldo 1          | Folha   | 1,46 | 0,29 | 0,12 | 0,06 | 0,01 |
| Boldo            | Caule   | 1,16 | 0,23 | 0,09 | 0,05 | 0,01 |
| Boldo 2          | Folha   | 3,46 | 0,69 | 0,28 | 0,14 | 0,03 |
| Camomila         | Flor    | 1,66 | 0,33 | 0,13 | 0,07 | 0,02 |
| Cana do Brejo    | Folha   | 1,51 | 0,30 | 0,12 | 0,06 | 0,02 |
| Cana do Brejo    | Caule   | 0,71 | 0,14 | 0,06 | 0,03 | 0,01 |
| Erva Cidreira    | Caule   | 5,05 | 1,01 | 0,40 | 0,20 | 0,05 |
| Erva Doce        | Semente | 3,41 | 0,68 | 0,27 | 0,14 | 0,03 |
| Espinheira Santa | Folha   | 1,48 | 0,30 | 0,12 | 0,06 | 0,01 |
| Espinheira Santa | Caule   | 1,21 | 0,24 | 0,10 | 0,05 | 0,01 |
| Eucalipto        | Folha   | 1,49 | 0,30 | 0,12 | 0,06 | 0,01 |
| Eucalipto        | Caule   | 2,43 | 0,49 | 0,19 | 0,10 | 0,02 |
| Funcho           | Folha   | 2,85 | 0,57 | 0,23 | 0,11 | 0,03 |
| Gengibre         | Poupa   | 2,03 | 0,41 | 0,16 | 0,08 | 0,02 |
| Girassol         | Semente | 0,65 | 0,13 | 0,05 | 0,03 | 0,01 |
| Hortelã          | Folha   | 3,57 | 0,71 | 0,29 | 0,14 | 0,04 |
| Limão Galego     | Poupa   | 1,23 | 0,25 | 0,10 | 0,05 | 0,01 |
| Louro            | Folha   | 0,59 | 0,12 | 0,05 | 0,02 | 0,01 |
| Manjerona        | Folha   | 0,84 | 0,17 | 0,07 | 0,03 | 0,01 |
| Menta            | Folha   | 3,92 | 0,78 | 0,31 | 0,16 | 0,04 |
| Noni 1           | Folha   | 1,46 | 0,29 | 0,12 | 0,06 | 0,01 |

|             |       |      |      |      |      |      |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|
| Noni        | Caule | 1,66 | 0,33 | 0,13 | 0,07 | 0,02 |
| Noni 2      | Folha | 1,51 | 0,30 | 0,12 | 0,06 | 0,02 |
| Pitanga     | Caule | 1,56 | 0,31 | 0,12 | 0,06 | 0,02 |
| Sálvia      | Folha | 2,39 | 0,48 | 0,19 | 0,10 | 0,02 |
| Stévia      | Folha | 2,24 | 0,45 | 0,18 | 0,09 | 0,02 |
| Tomilho     | Folha | 2,76 | 0,55 | 0,22 | 0,11 | 0,03 |
| Tanchagem 1 | Folha | 2,54 | 0,51 | 0,20 | 0,10 | 0,03 |
| Tanchagem 2 | Folha | 4,43 | 0,89 | 0,35 | 0,18 | 0,04 |

As amostras que mais contribuíram para as doses foi a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*) ( $8,60 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ), o caule de Erva Cidreira (*Melissa officinalis L.*) ( $5,05 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) e a folha de Tanchagem 2 (*Plantago major*) ( $4,43 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ). Os menores valores de doses encontrados referem-se a poupa de Alho (*Allium sativum*) ( $0,56 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ), a folha de Louro (*Laurus nobilis L.*) ( $0,59 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) e a semente de Girassol (*Helianthus annuus L.*) ( $0,65 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ). A diferença dos valores aferidos nas amostras que continham a maior dose e a menor é superior 1435%, entretanto as doses encontradas neste estudo estão abaixo dos valores médios estabelecidos pela UNSCEAR. A figura 41 representa o somatório das doses efetivas para cada estrutura botânica das 35 amostras de plantas medicinais referentes a este estudo.



**Figura 41:** Acumulado de dose efetiva relativa a cada estrutura botânica.

A soma das doses referente a estrutura botânica folha ( $54,97 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) representa 69,11% do acumulado total e a média de dose para esta estrutura equivale a  $2,62 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ , enquanto para o caule ( $15,03 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) representa 18,90% com uma média de dose correspondente a  $1,88 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ . A poupa ( $3,82 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) tem uma representatividade de 4,80% e uma média de dose igual a  $1,27 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ , ao passo que a flor é a estrutura de menor representatividade 2,09% com a contribuição de apenas uma planta camomila (*Matricaria recutita L.*) e o valor de sua dose equivale a  $1,66 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ . A semente ( $4,06 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) apresenta a segunda maior média de dose igual a  $2,03 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$  e representa 5,10%. A diferença entre a média da estrutura de maior representatividade (folha) e a menor (flor) é 57,83%, ao passo que a diferença entre a menor média de dose (poupa) e a maior (folha) é 106,30%.

#### 4.3. Cálculo da Estimativa do Risco de Câncer Devido a Ingestão de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Th}$ das Amostras de Plantas Medicinais

A tabela 17 mostra o risco de câncer referentes aos radionuclídeos nas 35 amostras de plantas medicinais e a tabela 18 indica o cálculo de risco de câncer relativo a contribuição de cada radionuclídeo.

**Tabela 17:** Cálculo do risco de câncer ( $10^{-6}$ ).

| Plantas          | Parte   | Dose Total Radionuclídeos ( $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) | Dose Efetiva da Vida Útil (Cd) ( $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ) | Risco de Câncer ( $10^{-6}$ ) |
|------------------|---------|---|--|-------------------------------|
| Alecrim          | Folha   | 1,77  | 135,23   | 6,76                          |
| Alho             | Poupa   | 0,56  | 42,78  | 2,14                          |
| Amora            | Folha   | 3,72  | 284,21   | 14,21                         |
| Amora            | Caule   | 1,25  | 95,50  | 4,78                          |
| Babosa           | Folha   | 2,38  | 181,83   | 9,09                          |
| Boldo do Chile   | Folha   | 8,60  | 657,04   | 32,85                         |
| Boldo 1          | Folha   | 1,46  | 111,54   | 5,58                          |
| Boldo            | Caule   | 1,16  | 88,62  | 4,43                          |
| Boldo 2          | Folha   | 3,46  | 264,34   | 13,22                         |
| Camomila         | Flor    | 1,66  | 126,82   | 6,34                          |
| Cana do Brejo    | Folha   | 1,51  | 115,36   | 5,77                          |
| Cana do Brejo    | Caule   | 0,71  | 54,24  | 2,71                          |
| Erva Cidreira    | Caule   | 5,05  | 385,82   | 19,29                         |
| Erva Doce        | Semente | 3,41  | 260,52   | 13,03                         |
| Espinheira Santa | Folha   | 1,48  | 113,07   | 5,65                          |
| Espinheira Santa | Caule   | 1,21  | 92,44  | 4,62                          |
| Eucalipto        | Folha   | 1,49  | 113,84   | 5,69                          |
| Eucalipto        | Caule   | 2,43  | 185,65   | 9,28                          |
| Funcho           | Folha   | 2,85  | 217,74   | 10,89                         |
| Gengibre         | Poupa   | 2,03  | 155,09   | 7,75                          |

|              |         |      |        |       |
|--------------|---------|------|--------|-------|
| Girassol     | Semente | 0,65 | 49,66  | 2,48  |
| Hortelã      | Folha   | 3,57 | 272,75 | 13,64 |
| Limão Galego | Poupa   | 1,23 | 93,97  | 4,70  |
| Louro        | Folha   | 0,59 | 45,08  | 2,25  |
| Manjerona    | Folha   | 0,84 | 64,18  | 3,21  |
| Menta        | Folha   | 3,92 | 299,49 | 14,97 |
| Noni 1       | Folha   | 1,46 | 111,54 | 5,58  |
| Noni         | Caule   | 1,66 | 126,82 | 6,34  |
| Noni 2       | Folha   | 1,51 | 115,36 | 5,77  |
| Pitanga      | Caule   | 1,56 | 119,18 | 5,96  |
| Sálvia       | Folha   | 2,39 | 182,60 | 9,13  |
| Stévia       | Folha   | 2,24 | 171,14 | 8,56  |
| Tomilho      | Folha   | 2,76 | 210,86 | 10,54 |
| Tanchagem 1  | Folha   | 2,54 | 194,06 | 9,70  |
| Tanchagem 2  | Folha   | 4,43 | 338,45 | 16,92 |

**Tabela 18:** Análise do Risco de Câncer para cada Radionuclídeo.

| Radionuclídeos    | Risco de Câncer<br>(10 <sup>-6</sup> ) | Percentual |
|-------------------|--|------------|
| <sup>40</sup> K   | 179,51                                 | 59,06%     |
| <sup>226</sup> Ra | 16,80                                  | 5,53%      |
| <sup>228</sup> Ra | 107,63                                 | 35,41%     |
| <sup>228</sup> Th | 0,0125                                 | 0,00%      |

O maior valor encontrado para o risco de câncer se deve a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*) ( $32,85 \times 10^{-6}$ ), por outro lado o menor valor aferido é referente a popa de Alho (*Allium sativum*) com o valor de ( $2,14 \times 10^{-6}$ ). Entretanto o valor médio calculado para o risco de câncer gira em torno de ( $8,68 \times 10^{-6}$ ) e o desvio padrão atribuído as 35 amostras de plantas medicinais é de ( $5,95 \times 10^{-6}$ ). A média geométrica é um parâmetro importante para mostrar possíveis índices de efeitos cumulativos e fornece uma medida representativa da tendência central de forma mais adequada, ou seja, mostra para onde direciona-se a maior concentração dos dados e o valor encontrado foi de ( $7,15 \times 10^{-6}$ ). Isto significa dizer que este valor da média geométrica equivale aproximadamente 7 casos por milhão de habitantes devido à ingestão das amostras analisadas neste estudo. Foi estimado o valor total de risco em 304 casos por milhão de habitantes.

#### 4.4. Cálculos de Dose Absorvida e Dose Efetiva Externa

A tabela 19 apresenta os valores da dose absorvida e da dose efetiva externa referente aos radionuclídeos das 55 amostras de plantas medicinais e ornamentais referentes a este estudo.

**Tabela 19:** Cálculo da dose absorvida e da dose efetiva externa.

| Plantas        | Parte | Dose externa<br>(absorvida) Da<br>( $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ ) | Dose efetiva externa<br>Def ( $\mu\text{Sv.y}^{-1}$ ) |
|----------------|-------|--|---|
| Alecrim        | Folha | 11,32  | 13,88   |
| Alho           | Poupa | 2,84   | 3,48  |
| Amora          | Folha | 21,26  | 26,07   |
| Amora          | Caule | 5,43   | 6,66  |
| Antúrio        | Folha | 26,76  | 32,82   |
| Antúrio        | Caule | 6,55   | 8,04  |
| Babosa         | Folha | 14,21  | 17,42   |
| Boldo do Chile | Folha | 49,05  | 60,15   |



|                            |         |       |       |
|----------------------------|---------|-------|-------|
| Boldo 1                    | Folha   | 8,67  | 10,64 |
| Boldo                      | Caule   | 5,67  | 6,95  |
| Boldo 2                    | Folha   | 19,25 | 23,61 |
| Bromélia                   | Caule   | 5,45  | 6,68  |
| Bromélia                   | Flor    | 7,05  | 8,65  |
| Camomila                   | Flor    | 9,39  | 11,52 |
| Cana do Brejo              | Folha   | 8,49  | 10,41 |
| Cana do Brejo              | Caule   | 4,21  | 5,17  |
| Comigo Ninguém Pode        | Folha   | 28,39 | 34,82 |
| Copo de Leite              | Folha   | 43,11 | 52,86 |
| Copo de Leite              | Caule   | 44,46 | 54,53 |
| Coqueirinho                | Folha   | 10,80 | 13,24 |
| Coração de Maria           | Folha   | 22,48 | 27,57 |
| Coração de Maria           | Caule   | 26,73 | 32,78 |
| Equinácea-de-folha-cortada | Folha   | 14,46 | 17,73 |
| Equinácea-de-folha-cortada | Caule   | 10,44 | 12,80 |
| Equinácea-de-folha-cortada | Flor    | 7,35  | 9,01  |
| Erva Cidreira              | Caule   | 21,43 | 26,28 |
| Erva Doce                  | Semente | 20,07 | 24,61 |
| Espada de São Jorge        | Folha   | 15,10 | 18,52 |
| Espinheira Santa           | Folha   | 7,79  | 9,56  |
| Espinheira Santa           | Caule   | 7,16  | 8,78  |

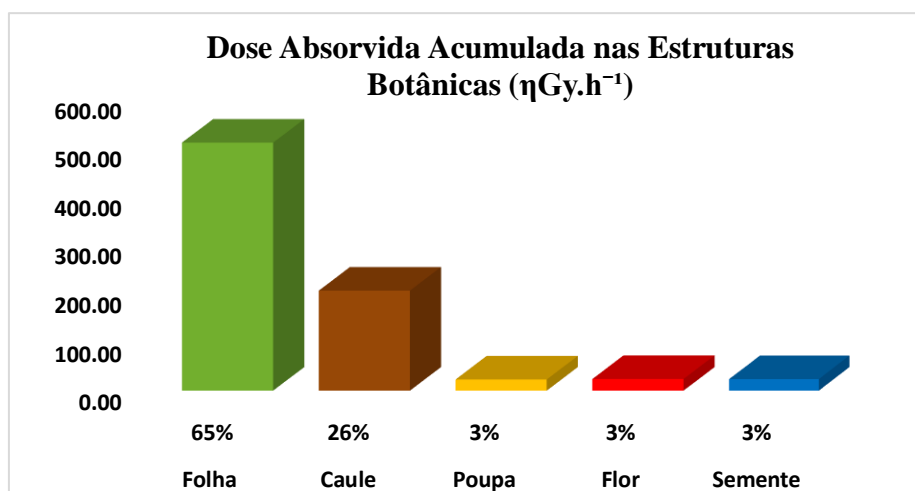
|              |         |       |       |
|--------------|---------|-------|-------|
| Eucalipto    | Folha   | 7,35  | 9,01  |
| Eucalipto    | Caule   | 13,06 | 16,02 |
| Funcho       | Folha   | 17,75 | 21,77 |
| Gengibre     | Poupa   | 12,61 | 15,46 |
| Girassol     | Semente | 3,54  | 4,35  |
| Hibísco      | Folha   | 19,06 | 23,37 |
| Hibísco      | Caule   | 18,97 | 23,26 |
| Hortelã      | Folha   | 18,75 | 22,99 |
| Hortênciã    | Caule   | 8,75  | 10,74 |
| Limão Galego | Poupa   | 7,35  | 9,01  |
| Louro        | Folha   | 2,74  | 3,35  |
| Manjerona    | Folha   | 3,47  | 4,26  |
| Menta        | Folha   | 22,73 | 27,87 |
| Noni 1       | Folha   | 7,66  | 9,40  |
| Noni         | Caule   | 9,49  | 11,63 |
| Noni 2       | Folha   | 8,26  | 10,13 |
| Orquídea     | Folha   | 18,03 | 22,11 |
| Orquídea 1   | Caule   | 4,29  | 5,27  |
| Orquídea 2   | Caule   | 2,90  | 3,55  |
| Pitanga      | Caule   | 9,71  | 11,91 |
| Sálvia       | Folha   | 15,17 | 18,60 |
| Stévia       | Folha   | 14,38 | 17,64 |

|             |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|
| Tomilho     | Folha | 15,73 | 19,29 |
| Tanchagem 1 | Folha | 11,27 | 13,82 |
| Tanchagem 2 | Folha | 24,24 | 29,72 |

Para todas as amostras analisadas neste estudo a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*) é a que apresenta o maior valor para dose absorvida ( $49,05 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$ ), enquanto a folha de Louro (*Laurus nobilis L.*) obteve o menor valor ( $2,74 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$ ). Os valores representam uma diferença de 1690%. A média encontrada de dose absorvida nas 55 amostras é ( $14,23 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$ ). Dentre as amostras analisadas, vinte e três 41,82% apresentam dose absorvida superior à média.

O maior valor de dose absorvida relativo ao grupo 1 se deve a folha de boldo do chile que possui também o maior valor global, enquanto para o grupo 2 o maior valor obtido se deve ao caule do Copo de Leite (*Zantedeschia aethiopica*) ( $44,46 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$ ). Já o menor valor referente ao grupo 1 se deve a folha de Louro (*Laurus nobilis L.*) que também possui o menor valor global, contudo o menor valor observado para o grupo 2 é ( $2,90 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$ ) relativo ao caule de Orquídea 2 (*Phalaenopsis hybrido*).

A média aferida no grupo 1 é ( $12,61 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$ ), enquanto para o grupo 2 é ( $17,06 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$ ). Para o grupo 1, quinze (42,86%) amostras apresentam dose absorvida igual ou superior à média. No grupo 2, nove (45%) amostras apresentaram valores superiores à média. A figura 42 apresenta a dose absorvida acumulada para cada estrutura botânica.



**Figura 42:** Dose absorvida acumulada para cada estrutura botânica de plantas medicinais e ornamentais analisadas.

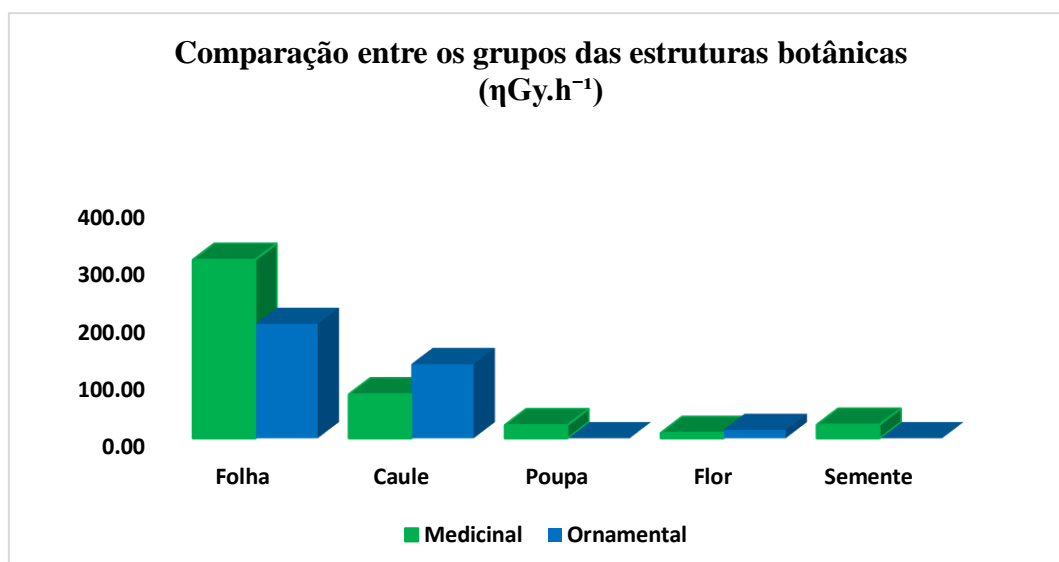
Para a estrutura botânica folha, aquela que apresenta o maior valor de dose absorvida é o Boldo do Chile (*Peumus boldus*), que possui também o maior valor global. Já o menor valor para essa estrutura se deve ao Louro (*Laurus nobilis L.*) que também possui o menor valor global.

O caule apresenta o maior valor para o Copo de Leite (*Zantedeschia aethiopica*) (44,46  $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ ), enquanto o menor valor é (2,90  $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ ) relativo a Orquídea 2 (*Phalaenopsis hybrido*).

A poupa apresenta o maior valor para o Gengibre (*Zingiber officinale roscoe*) (12,61  $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ ), enquanto o menor valor é (2,84  $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ ) para o Alho (*Allium sativum*).

A Camomila (*Matricaria recutita L.*) (9,39  $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ ) é o maior valor para a estrutura flor, já o menor valor encontrado se deve a Bromélia (*Bromelia antiacantha bertol*) (7,05  $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ ).

O maior valor encontrado para estrutura semente se deve a Erva Doce (*Pimpinella anisum*) (20,07  $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ ), enquanto o menor se deve ao Girassol (*Helianthus annuus L.*) (3,54  $\eta\text{Gy.h}^{-1}$ ). A figura 43 traz a comparação dos grupo1 e grupo2 quanto as estruturas botânicas.



**Figura 43:** Comparação entre os grupos das estruturas botânicas das plantas medicinais e ornamentais analisadas.

Para a estrutura folha, a diferença entre os dois grupos é de 56%, enquanto para o caule é de 69%. A poupa e a semente não apresentam valores para as plantas do grupo 2 e a diferença entre a estrutura flor é equivalente a 53%. As estruturas que mais contribuíram para a dose absorvida são a folha e o caule, que juntas são responsáveis por 91% da dose absorvida analisadas neste estudo.

A análise das 55 amostras referentes a este estudo, indica a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*) com o maior valor para dose efetiva externa ( $60,15 \mu\text{Sv.y}^{-1}$ ), enquanto a folha de Louro (*Laurus nobilis L.*) obteve o menor valor ( $3,35 \mu\text{Sv.y}^{-1}$ ). Os valores representam uma diferença de 1696%.

A média encontrada de dose efetiva externa para o conjunto de amostras deste trabalho é ( $17,45 \mu\text{Sv.y}^{-1}$ ). Dentre as amostras analisadas, vinte e três (41,82%) apresentam dose absorvida superior à média. Nota-se que as estruturas botânicas que apresentaram a maior e a menor dose absorvida são as mesmas para a dose efetiva externa, isto se dá, porque o cálculo da dose efetiva externa é proporcional a dose absorvida, cuja as constantes de proporcionalidade são referentes ao fator de ocupação, e alguns fatores de conversão. Entretanto, a diferença relativa ao maior e menor valor de dose efetiva externa não são os mesmos para a dose absorvida, assim como as médias apresentam valores distintos.

O maior valor de dose efetiva externa relativo ao grupo 1 se deve a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*) que possui também o maior valor global, enquanto para o grupo 2 o maior valor obtido se deve ao caule do Copo de Leite (*Zantedeschia aethiopica*) ( $54,53 \mu\text{Sv.y}^{-1}$ ). Já o menor valor referente ao grupo 1 se deve a folha de Louro (*Laurus nobilis* L.) que também possui o menor valor global, contudo o menor valor observado para o grupo 2 é ( $3,55 \mu\text{Sv.y}^{-1}$ ) relativo ao caule de Orquídea 2 (*Phalaenopsis hybrido*). Estas estruturas são as mesmas na análise da dose absorvida, como citado anteriormente a relação entre a dose absorvida e a dose efetiva externa são as constantes de proporcionalidade.

A média aferida no grupo 1 é ( $15,47 \mu\text{Sv.y}^{-1}$ ), enquanto para o grupo 2 é ( $20,92 \mu\text{Sv.y}^{-1}$ ). Para o grupo 1, quatorze (40%) amostras apresentam dose efetiva externa superior à média. No grupo 2, nove (45%) amostras apresentaram valores superiores à média.

## CAPÍTULO 5

### Conclusão

Neste estudo, foram determinadas as concentrações de atividade dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$  em amostras de plantas medicinais e ornamentais utilizando espectrometria gama de alta resolução em um detector de germânio hiper-puro (HPGe).

Em relação a concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$ , cinquenta (90,91%) amostras apresentam valores superiores à atividade mínima detectável (MDA). Os valores variaram entre a poupa de alho (*Allium sativum*) ( $29,41 \pm 9,85 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) e o caule de copo de leite (*Zantedeschia aethiopica*) ( $921,72 \pm 45,87 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Para o  $^{226}\text{Ra}$ , vinte e sete (49,09%) amostras apresentam valores de concentração de atividade específica superiores a (MDA). Os valores variaram entre a folha de Babosa (*Aloe vera*) ( $1,02 \pm 0,60 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) e a folha de Boldo do Chile (*Peumus boldus*) ( $6,08 \pm 1,02 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Já para o  $^{228}\text{Ra}$ , quarenta e quatro (80%) amostras apresentam valores de concentração de atividade específica superiores a (MDA). Os valores variaram entre o caule de Pitanga (*Eugenia uniflora*) ( $1,60 \pm 0,37 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) e o caule de Erva Cidreira (*Melissa officinalis L.*) ( $25,83 \pm 0,80 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Para o  $^{228}\text{Th}$ , trinta e quatro (61,82%) amostras apresentam valores de concentração de atividade específica superiores a (MDA). Os valores variam entre a flor de Camomila (*Matricaria recutita L.*) ( $1,02 \pm 0,98 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) e o caule de Erva Cidreira (*Melissa officinalis L.*) ( $10,65 \pm 1,66 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). O  $^{40}\text{K}$  foi responsável por 96,60% da concentração de atividade total.

Os valores de dose efetiva foram calculados com base nas concentrações de atividades específicas, bem como os dados do consumo médio anual e nos coeficientes de dose da (CNEN, 2014). Os valores individuais das 35 amostras medicinais analisadas, bem como a soma total ( $79,54 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ ), estão bem abaixo dos valores de referência para limite de dose recomendado de  $1\text{mSv.ano}^{-1}$  (ICRP, 2007). O  $^{40}\text{K}$  foi o radionuclídeo com a maior contribuição para dose efetiva com o valor de 59% do total. Entretanto, o  $^{228}\text{Ra}$  por ser um radionuclídeo com alto fator de conversão para dose efetiva comprometida tem uma contribuição significativa de 35% da dose total. A folha é a estrutura botânica que apresenta a maior contribuição e representa mais de 69% da dose

efetiva comprometida total. O caule também tem uma representatividade importante com mais de 18% da dose efetiva total.

O cálculo para estimar o risco de câncer dos radionuclídeos presentes nas amostras das plantas medicinais (grupo 1), verifica-se que, o  $^{40}\text{K}$  foi o que apresentou maior fator de risco entre os radionuclídeos analisados e representa 59%, enquanto o  $^{228}\text{Ra}$  35% do risco total. Estes dois radionuclídeos são responsáveis por 94% do risco total de câncer, entretanto os valores obtidos neste estudo estão dentro dos valores normais encontrados na literatura. Vale ressaltar que esta estimativa deve ser interpretada juntamente com uma análise de proteção radiológica, uma vez que se trata de uma avaliação de risco epidemiológico, que não pode ser convertida de modo direto em ocorrência de Câncer.

Para obter a dose absorvida, foram feitos cálculos utilizando as concentrações de atividades específicas do  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$ , com os respectivos fatores de ponderação para cada radionuclídeo. O cálculo da dose efetiva externa é proporcional a dose absorvida, cuja as constantes de proporcionalidade são referentes ao fator de ocupação, fator de conversão de dose e o tempo. Os maiores valores para dose absorvida e dose efetiva externa, se deve a folha de boldo do chile (*Peumus boldus*) ( $49,05 \text{ nGy.h}^{-1}$ ), ( $60,15 \text{ μSv.y}^{-1}$ ) respectivamente, enquanto a folha de louro (*Laurus nobilis L.*) obteve os menores valores ( $2,74 \text{ nGy.h}^{-1}$ ), ( $3,35 \text{ μSv.y}^{-1}$ ) respectivamente.

Este trabalho traz uma significativa contribuição de dados para a literatura, no que tange as concentrações de atividades específicas dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$ , principalmente para o grupo 2 de plantas ornamentais, cuja literatura não apresenta trabalhos relevantes para uma análise mais profunda. Já para as plantas do grupo 1, a contribuição se dá, pela gama de estruturas botânicas analisadas e a diversidade de plantas medicinais. Além de apresentar as concentrações de atividade específica, foi apresentado também a dose efetiva, o risco de câncer e para os dois grupos de plantas, a dose absorvida e a dose efetiva externa.

Dessa forma, verifica-se que os objetivos delineados na presente pesquisa foram satisfatoriamente alcançados. Como perspectivas para investigações futuras, sugere-se a realização de estudos voltados à estimativa do fator de transferência de radionuclídeos do solo para as distintas estruturas botânicas, visando identificar quais compartimentos vegetais apresentam maior capacidade de retenção desses radionuclídeos.



## Referências Bibliográficas:

- AAECRE. AUSTRALIAN ATOMIC ENERGY COMMISSION RESEARCH ESTABLISHMENT. A Guide and Instruction for Determining g-Ray Emission Rates With Germanium Detector Systems. Debertin. Braunschweig, 1980.
- ALVES, F.V.,2010-“Composição Química e Qualidade Fisiológica de Sementes de Girassol de Plantas Submetidas à Competição Intraespecífica”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).
- ARAÚJO, Cristina Ruan Ferreira de; SILVA, Allan Batista; TAVARES, Edimara Clementino; COSTA, Eliene Pereira da; MARIZ, Saulo Rios. Perfil e prevalência de uso de plantas medicinais em uma unidade básica de saúde da família em Campina Grande, Paraíba, Brasil. *Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada*, v. 35, n. 2, p. 233–238, 2014. ISSN 1808-4532.
- BOHM, Franciele Zanardo; OLIVEIRA, Yasmin de. Levantamento etnobotânico do consumo de plantas medicinais utilizadas na cidade de Colorado, Paraná. *Luminária*, União da Vitória, v. 24, n. 1, p. 6–14, 2022. ISSN 2359-4373.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conservação in situ, ex situ e on farm. Brasília: MMA,[s.d.].Disponívelem:<https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/7611conserva%C3%A7%C3%A3o-in-situ%2C-ex-situ-e-on-farm.html>. Acesso em: 09 Abril de 2025.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Monografia da Espécie *Foeniculum vulgare* Mill. (Funcho). Brasília: Ministério da Saúde, 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/2017/arquivos/MonografiaFuncho.pdf>. Acesso em: 18 Março 2025.

- BRASIL.Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. Práticas integrativas e complementares: plantas medicinais e fitoterapia na Atenção Básica/Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. – Brasília: Ministério da Saúde, 2012. 156 p.: il. – (Série A. Normas e Manuais Técnicos) (Cadernos de Atenção Básica; n.31).
- 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.
- CANBERRA, Genie™ 2000 3.3: Operations Manual, EUA, 2012.
- CARRÃO-PANIZZI, M. C.; MANDARINO, J. M. Produtos protéicos do girassol. In: EMBRAPA. *Título do livro*. [S.l.]: [s.n.], [s.d.]. p.51-68. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/468445/1/Capitulo-4.pdf>. Acesso em: 18 Março 2025.
- CASTILHOS, Penélope Filippin; BARBATO, Paulo Roberto; BOING, Alexandra Crispim. Prevalência e fatores associados à utilização de plantas medicinais e fitoterapia no Brasil. *Revista Fitos*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p. 400–410, 2023. Disponível em: <http://revistafitos.far.fiocruz.br/index.php/revista-fitos/article/view/1477>. Acesso em: 23 de Março 2025.
- CAVALCANTE, F. Avaliação da Radioatividade Natural e Artificial em Rações Comerciais para Animais Domésticos. Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2017.
- 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).

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Norma CNEN-NN-3.01: FATORES DE PONDERAÇÃO PARA AS GRANDEZAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA. Alterada pela Resolução CNEN nº 230, de 05.09.2018, publicada no DOU em 25.09.2018.

CORDEIRO, Sandra Zorat. *Anthurium andraeanum Linden ex André* – antúrio. 2019. Disponível em: <https://www.unirio.br/ccbs/ibio/herbariohuni/anthurium-andraeanum-linden>. Acesso em: 9 Fevereiro 2025.

COUTO, MERY ELIZABETH. Coleção de plantas medicinais aromáticas e condimentares. –Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 91p.- -(Embrapa Clima Temperado. Documentos, 157).

DESIDERE. D, MELI. M. A.,ROSELLI. C., 2010. Natural artificial radioactivity determination of some medicinal plants, Journal of Environmental Radioactivity. Volume 101, Issue 9, Pages 751-756.

ELLA.V., LYLES. J.T., QUAVE. L.C., The 2022. Genus Rudbeckia: A critical review of its traditional medicinal uses, phytochemistry, and pharmacology, Journal of Herbal Medicine, Volume 31, 2022 .

FERREIRA, K.C., 2018, Determinação das doses efetivas de alimentos, água e solo na região do caubi através da espectrometria de raios gama. Dissertação de M. Sc. UnB – Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.

FONSECA, A. S. A. Exposição crônica a radiação ionizante: realidade ou fantasia. A construção de um protocolo para avaliação. p. 168, 2009.

GARCÊZ, R. W. D., 2016, A radiação gama no feijão com arroz. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Física) – Universidade Federal Fluminense. Instituto de Física, Niterói, Brasil.

- 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.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009 vol 4;
- HEIDEN. G, BARBIERI. R., STUMPF.E.R.T., 2006- Considerações sobre o uso de plantas ornamentais nativas.
- HEWITT, PAUL G. Física Conceitual. tradução: Trieste Freire Ricci; revisão técnica: Maria Helena Gravina. 11. Ed- Porto Alegre: Bookman, 2011.
- EISBERG, RESNICK. Física quântica. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas: 1.ed.São Paulo: LTC, 1979.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. Measurements of radionuclides in food and the environment. Technical Report Series 295, Vienna, 1989.
- ICRP, 1991. 1990 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).
- INCA - Instituto Nacional de Câncer. Estimativa para 2022 até 2025: Incidência de câncer no Brasil. INCA, Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Coordenação de Prevenção e Vigilância. Rio de Janeiro, Brasil; 2025. <https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/noticias/2022/inca-estima-704-mil-casos-de-cancer-por-ano-no-brasil-ate-2025>

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.

KNOLL, G. F; Radiation Detection and Measurement. John Wley and sons, 4<sup>a</sup> ed, USA, 2010.

LIMA. I.A.F.S.,2019-“Acumulação de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$   $^{228}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em Raízes de Ipomea Batatas (L.) Lam.”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

LOPES, J. M., 2018, Dose Efetiva Comprometida Devido aos Radionuclídeos  $\text{K}^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$  Contidos nos Alimentos da Dieta da População do Estado do Rio de Janeiro. Tese de D. Sc. PEN/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LORENZI, Harri; SOUZA, Hermes Moreira de. *Plantas ornamentais no Brasil: arbustivas, herbáceas e trepadeiras*. 4. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008. 1088 p.

MALETSKOS C. J., KEANE, A. T., TELLES N. C. & EVANS, R. D. (1966). The metabolismo of intravenously administered radium and thorium in human beings and the relative absorption from the human gastrointestinal tract of radium and

thorium in simulated radium dial painters. In Radium and Mesothorium Poisoning Dosimetry and Instrumentation Techniques in Applied Radioactivity. MIT-952-3, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, Physics Department, 202-3 17.

MARQUES, Natália Faria; ROCHA, Gilson Fagundes da; CORDEIRO, Sandra Zorat. *Sansevieria trifasciata Prain* – espada-de-são-jorge. 2020. Disponível em: <https://www.unirio.br/ccbs/ibio/herbariohuni/sansevieria-trifasciata-prain>. Acesso em: 12 Fevereiro 2025.

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

OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia, 2013.

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

PANAMERICANA, O. S. Las Radiaciones Ionizantes y sus Efectos en la Población. 1959.

PLANTAS ORNAMENTAIS: Aspectos para a produção/ Cláudia Petry (org.).-2. Ed., rev. e ampl.- Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. 202p.

PODGORSK, E. B. Radiation Physics for Medical Physicists. [S.l.]: Springer, 2010.

ROWLAND, R. E; STEHNEY, A. F. & LUCAS, H. F. (1978). Dose-response relationships for female radium dial workers, Radiat. Res., 76, 368-83.

SANTOS JÚNIOR, J. A., 2009-“Avaliação Radiométrica do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em uma Área Anômala do Agreste de Pernambuco”. Tese de Doutorado. Programa

de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

SANTOS.N.R., DOMINGUES.A.M., SILVA.A.X., SOUZA.E.M., LIMA.I.C.B.,2022-  
Determinação de Curvas de Eficiência para Análise de Presença de Radionuclídeos em Frutas Orgânicas Através de Espectrometria Gama Utilizando Detector HPGe.

SHANTHI, G. et al. Transfer factor of the radionuclides in food crops from high-background radiation area of south west India. Radiation Protection Dosimetry, v. 149, n. 3, p. 327–332, 2012.

SCHEIBEL, V. Determinação das doses efetivas por ingestão de farinhas de cereais através da espectrometria de raios gama. Universidade Estadual de Londrina, 2006. Tese (Doutorado em Física) Universidade de Londrina, Paraná.

SILVA, R.C.,2018, Determinação das Concentrações das Atividades de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  em Diferentes Tipos de Chás. Dissertação - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA, L.B.,2020-“Cálculo de Dose Efetiva Comprometida e Estimativa de Incidência de Câncer Devido a ingestão de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$  em Grãos da Dieta da População do Município de Poços de Caldas (MG)”. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Nuclear (PEN) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

SILVA, R.C.,2022, Fator de Transferência de Radionuclídeos e de Metais em Processos de Infusão de Ervas. Tese de Doutorado - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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.

UMISED, N. K. Universidade de São Paulo Faculdade de Saúde Pública Dose de radiação ionizante decorrente do uso de fertilizantes agrícolas Dose de radiação ionizante decorrente do uso de fertilizantes agrícolas. 2007.

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.