



DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DAS ATIVIDADES DE RÁDIO-226,
RÁDIO-228, E POTÁSSIO-40 EM DIFERENTES TIPOS DE CHÁS

Roberto Cruz da Silva

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

Março de 2018

DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DAS ATIVIDADES DE RÁDIO-226,
RÁDIO-228, E POTÁSSIO-40 EM DIFERENTES TIPOS DE CHÁS

Roberto Cruz da Silva

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

Examinada por:

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

Prof. César Marques Salgado, D.Sc.

Prof. Wagner de Souza Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2018

Silva, Roberto Cruz da

Determinação das Concentrações das Atividades de Rádio-226, Rádio-228, e Potássio-40 em diferentes tipos de chás / Roberto Cruz da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

X, 52 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 43-48.

1. Chás. 2. Concentrações das Atividades. 3. LabSOCS. I. Silva, Ademir Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Rose e à minha filha Leticia pelo amor incondicional pelas orações, e por acreditarem em mim.

Agradeço ao meu orientador professor D. Sc. Ademir da Silva Xavier, pelo apoio e pelas orientações.

Agradeço à professora D. Sc. Carla da Silva Pinheiro, pelo apoio e pelas orientações.

Agradeço também aos meus colegas de pesquisa pela parceria, em especial, ao D. Sc José Marques Lopes, M. Sc Alessandro Sá do Carmo e ao M. Sc Ricardo Washington Dutra Garcêz.

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 CONCENTRAÇÕES DAS ATIVIDADES DE RÁDIO-226, RÁDIO-228, E POTÁSSIO-40 EM DIFERENTES TIPOS DE CHÁS

Roberto Cruz da Silva

Março/2018

Orientadores: Ademir Xavier da Silva

Programa: Engenharia Nuclear

O chá é uma bebida preparada por infusão com partes de plantas como folhas, flores e raízes, geralmente preparadas com água quente, e cada variedade adquire um sabor definido de acordo com o processamento usado e, além disso, é uma bebida amplamente consumida em todo o mundo. Este trabalho apresenta uma investigação sobre as concentrações específicas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K em 24 amostras de chás utilizadas pela população brasileira e a dose efetiva associada. As amostras de chás foram secas durante seis horas em um forno a 60°C e colocadas em potes de polietileno de 200 ml, pesados com balança de modelo Gehaka BG 4000 e selados para atingir a condição de equilíbrio radioativo secular. As amostras de chás foram medidas usando a técnica de espectrometria gama usando detector de germânio de alta pureza (HPGe), e com o software LabSOCS para o cálculo da curva de eficiência. O tempo de contagem utilizado para a aquisição dos espectros de amostras foi de 30.000 segundos. Os valores de atividade específica para o ^{40}K variaram de $184 \pm 56\text{ Bq.kg}^{-1}$ para Capim Limão (*Cymbopogon citratus*) e $1087 \pm 40\text{ Bq.kg}^{-1}$ para Bardana (*Arctium lappa*). Para o ^{226}Ra os valores de atividade específica variaram de < 4 a $< 27\text{ Bq.kg}^{-1}$. Para o ^{228}Ra os valores de atividade específica variaram de 2 ± 1 a $27 \pm 3\text{ Bq.kg}^{-1}$. As doses efetivas variaram de $1,14\text{ }\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ até $18,63\text{ }\mu\text{Sv.ano}^{-1}$. Os valores apresentados neste estudo foram inferiores à média anual de dose efetiva de ingestão para adultos.

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 CONCENTRATIONS OF RADIUM-226, RADIUM-228 AND POTASSIUM-40 ACTIVITIES IN DIFERENT TYPES OF TEAS

Roberto Cruz da Silva

March/2018

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Department: Nuclear Engineering

Tea is an infusion prepared with plant parts such as leaves, flowers and roots, usually prepared with hot water, and each variety acquires a definite taste according to the processing used and, in addition, is a drink widely consumed throughout the world. This work presents an investigation of the specific concentrations of ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{40}K in 24 tea samples used by the Brazilian population and the associated effective dose. Tea samples were dried for six hours in a 60°C oven and placed in 200 ml polyethylene pots weighed with weighting machine model Gehaka BG 4000 and sealed to achieve the secular radioactive equilibrium condition. Teas samples were measured using the gamma spectrometry technique using high purity germanium detector (HPGe) and with the LabSOCS software to calculate the efficiency curve. The counting time used to acquire the sample spectra was 30.000 seconds. The specific activity values for ^{40}K ranged from $184 \pm 56\text{ Bq. kg}^{-1}$ Lemongrass (*Cymbopogon citratus*) and $1087 \pm 40\text{ Bq. kg}^{-1}$ for Burdock (*Arctium lappa*). For the ^{226}Ra the specific activity values ranged from <4 to $<27\text{ Bq. kg}^{-1}$. For the ^{228}Ra the specific activity values ranged from 2 ± 1 to $27 \pm 3\text{ Bq.kg}^{-1}$. The effective doses ranged from $1.14\ \mu\text{Sv} / \text{year}$ to $18.63\ \mu\text{Sv} / \text{year}$. The values presented in this study were lower than the annual average effective dose of ingestion for adults.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO.....	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 RADIAÇÃO IONIZANTE NATURAL	6
2.2 ELEMENTOS RADIOATIVOS.....	7
2.3 RADIONUCLÍDEOS EM ALIMENTOS.....	8
2.4 RADIONUCLÍDEOS NO ORGANISMO.....	10
2.5 CHÁS	11
2.5.1 História, produção e comercialização.....	11
2.5.2. Propriedades fisiológicas.....	12
2.5.3 Características morfológicas da <i>Camellia sinensis</i>	13
2.5.4 Legislação de chás no Brasil	14
2.6 DECAIMENTO RADIOATIVO E RADIONUCLÍDEOS.....	15
2.7 EQUILÍBRIO RADIOATIVO SECULAR.....	17
2.8 DETECTORES DE RADIAÇÕES IONIZANTES.....	18
2.9 SISTEMA DE ESPECTROMETRIA	18
2.10 BLINDAGEM.....	19
2.11 CRIOSTATO E <i>DEWAR</i>	20
2.12 CALIBRAÇÃO EM ENERGIA.....	21
2.13 ESPECTROMETRIA GAMA.....	22
2.14 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS ..	22
2.15 COMPOSIÇÃO DE GEOMETRIAS.....	23
2.16 PROGRAMA ANÁLISES GAMA.....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. AQUISIÇÃO DAS AMOSTRAS	25
3.1.1. Tratamento das amostras	27
3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	29
3.3 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE DETECÇÃO.....	31
3.4 DETERMINAÇÃO DO ^{226}Ra , ^{228}Ra E ^{40}K	31
3.4.1 Incerteza dos valores na atividade específica.....	32
3.4.2 Correções na atividade específica	32
3.5 LIMITE MÍNIMO DE DETECÇÃO	33
3.6 CÁLCULO DA DOSE EFETIVA	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1 ATIVIDADES ESPECÍFICAS DE ^{40}K NAS AMOSTRAS DE CHÁS.....	37

4.1.1 Dose efetiva para o ^{40}K	38
4.2 ATIVIDADE ESPECÍFICA E DOSE EFETIVA PARA O ^{226}Ra E ^{228}Ra EM AMOSTRAS DE CHÁ	38
4.3 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA	39
5. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXO I. ALGUNS ESPECTROS OBTIDOS NO PRESENTE ESTUDO.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de decaimento do ^{40}K para ^{40}Ar e ^{40}Ca	10
Figura 2 - Flores e folhas de <i>Camellia.sinensis</i>	14
Figura 3- Série radioativa parcial do ^{238}U	16
Figura 4 -Série radioativa do ^{232}Th	16
Figura 5 - Dewars e criostatos	21
Figura 6- Moinho manual marca Botini.	27
Figura 7 - Potes lacrados contendo amostras de chá.	28
Figura 8- Balança de precisão utilizada para a medição das massas das amostras.	29
Figura 9- Geometria do pote de 200 ml de polipropileno para colocação da amostra.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes da radiação ionizante natural na dose efetiva anual	6
Tabela 2 - Dados biocinéticos dos radionuclídeos de interesse.....	11
Tabela 3- Dados das amostras de chá analisadas e seus usos medicinais.	25
Tabela 4- Atividade específica do material utilizado como solvente.....	27
Tabela 5- Tempo de secagem das amostras de chá.	27
Tabela 6- Coeficientes de dose efetiva (<i>e</i>) por unidade de ingestão para membros do público (Publicação ICRP 119 (Corrigenda), 2012).	35
Tabela 7- Valor de MDA para o ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K nas amostras analisadas.....	36
Tabela 8- Atividades específicas e dose efetiva de ^{40}K para amostras de chá.	36
Tabela 9 -Atividades específicas de ^{226}Ra e ^{228}Ra para amostras de chá.	38

1. INTRODUÇÃO

O globo terrestre, desde sua formação, sempre esteve submetido a doses variáveis de radioatividade natural, provenientes tanto da radiação cósmica e interação desta com gases atmosféricos quanto do decaimento de radionuclídeos naturais. A maior contribuição para a exposição à radiação recebida pelo homem é proveniente de fontes naturais. De acordo com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), os radionuclídeos podem ser definidos como isótopos instáveis de elementos químicos que decaem ou transmutam espontaneamente, emitindo radiações ionizantes (PORTAL CNEN, 2017).

Nas últimas décadas, tem-se evidenciado um crescente interesse no estudo dos níveis de radioatividade natural, principalmente para os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K . O comportamento dos radionuclídeos nos diversos compartimentos ambientais é característico para cada elemento e para cada tipo de amostra contaminada.

O controle da radioatividade ambiental tem sido utilizado para obtenção de informações sobre a exposição às fontes radioativas naturais nos seres humanos e animais.

A deposição de material radioativo em áreas agrícolas é importante, tanto do ponto de vista da dose para as populações rurais quanto por seu impacto na contaminação de alimentos e na ração animal. Como o homem se alimenta com produtos de origem animal e vegetal, a análise de alimentos constitui um instrumento importante para a identificação e previsão da magnitude dos impactos potenciais sobre a saúde do homem.

Após uma liberação atmosférica, como por exemplo, acidentes em Usinas Nucleares, o comportamento dos radionuclídeos no ambiente, particularmente sua solubilidade e capacidade de fixação em diferentes superfícies, varia para cada elemento, de acordo com a forma físico-química na qual ele é emitido, com o tipo de deposição, seca ou úmida, e com as características do ambiente (UNSCEAR, 2000).

Nesse contexto, é fundamental o conhecimento de informações sobre os elementos radioativos desde a colheita até o consumo pelo homem e dos seus teores presentes na crosta continental, para estimar o risco radiológico proveniente desses isótopos naturais. Sendo assim, é necessário o estudo dos níveis de emissão radioativa em variados produtos e insumos agrícolas, tais como: os chás a segunda bebida mais consumida mundialmente (FAO, 2016).

O chá é uma bebida obtida a partir da infusão de plantas específicas em forma seca

ou natural. É uma bebida antiga e consumida em muitas culturas devido à tradição e seus benefícios para a saúde. Entre os tipos de chás consumidos no Brasil, destaca-se a camomila, por ser uma das ervas mais conhecidas e empregadas por seus efeitos calmantes e sua quantidade de propriedades curativas, cujo consumo estimado possa chegar a mais de 1 milhão de copos por dia (RAMOS *et al.*, 2004).

A maioria das plantas utilizadas como chás são provenientes da China e com as expedições de Marco Pólo e Gaspar da Cruz tornaram possível a chegada dos chás na Europa, no século XVI. No entanto, o hábito de consumir chá, somente se espalhou no século XVII, quando a Europa e o Oriente estabeleceram laços comerciais. A bebida tornou-se uma das mais consumidas graças à grande variedade de aromas, sabores e benefícios como ervas medicinais e passou a espalhar-se para o resto do mundo. A partir do século XIX, o chá tornou-se comum em todo o mundo, partindo para Inglaterra, Estados Unidos, Austrália, Canadá e diversos países. Esse hábito tornou-se, além de prazeroso, um tratamento medicinal, enquanto no Japão o preparo da bebida tornou-se uma arte (LIMA, 1997)

Em 2002, o Brasil teve uma colheita de 491 toneladas de diversos tipos de chás (SOUZA *et al.*, 2006). Desde os primórdios, a humanidade utiliza as ervas para o tratamento primário de doenças. Portanto, o estudo das concentrações de radionuclídeos em chás tem grande significado para a sociedade, uma vez que o uso viável de tais plantas para o tratamento de enfermos é quase universal em sociedades não industrializadas. De acordo com a Organização Mundial de Saúde, estima-se que cerca de 80% da população asiática e africana usam ervas como forma de medicamento em um aspecto relacionado aos cuidados de saúde primária (WHO, 1999).

O chá mate é o mais comercializado na América do Sul, onde há referência de que, aproximadamente, 30% da população desse continente consomem em média um litro de chá por dia (FILIP *et al.*, 2000).

Dados da pesquisa sobre aquisição de alimentos, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no período de 2008 a 2009, indicaram que o consumo per capita de chá mate no Brasil é 485 g e os diferentes tipos de chás de uma maneira geral que são consumidos como alimentos e com a finalidade de curar certas enfermidades, seu consumo chega a 500 g (IBGE, 2009).

Como mencionado anteriormente, o chá mate, produto típico da América do Sul, lidera o consumo de chás no Brasil, principalmente na região sul (IBGE, 2009). A vantagem do processamento da erva-mate na forma de chá é o que o seu consumo torna-se

menos sazonal e menos dependente dos hábitos culturais como o chimarrão, podendo ser preparado quente ou frio, combinado com sucos de frutas, sorvetes licores e leite, além disso, é muito utilizado como fins curativos que passa de geração em geração. A tradição do uso de plantas medicinais com fins curativos permanece até os dias atuais, cuja cultura é transmitida por gerações, de forma que muitas espécies de plantas são utilizadas para fins terapêuticos por comunidades em áreas rurais, o que vem se perpetuando por meio da medicina tradicional brasileira. Mas, esse uso não se restringe às áreas rurais, sendo também amplamente disseminado em áreas urbanas do país. Esta tradição está diretamente relacionada à busca do ser humano por métodos naturais de combate às doenças, visando uma melhor qualidade de vida (BADKE, 2008).

Atualmente, o interesse por plantas medicinais é impulsionado pelo desejo da população por uma vida mais saudável, assumindo crescente importância como recurso alternativo, proporcionando um aumento considerável em sua procura. Várias questões relacionadas às condições de saúde da população e do meio ambiente onde essa população vive geram preocupações de interesse de todos, no ponto de vista interdisciplinar. O estudo de práticas curativas e preventivas tradicionais, utilizando plantas medicinais, tem ganhado destaque na área de saúde ambiental, envolvendo profissionais de diversas áreas de conhecimento.

Como qualquer produto alimentar plantado e processado, quer manualmente quer industrialmente, está sujeito a possíveis contaminações, o monitoramento de radionuclídeos presentes nas amostras de plantas de caráter medicinal ou para fins alimentícios é feito para garantir a saúde da população e a proteção do meio ambiente.

Existem muitos radionuclídeos que ocorrem naturalmente no ambiente, incluindo os isótopos do urânio e do tório e seus produtos de decaimento. Entre estes radionuclídeos, um elemento significativo nessas propriedades é o potássio, que é associado ao sódio, cuja sua função é regular o sistema muscular e o ritmo cardíaco (MALANCA *et al.*, 1993).

Para medições de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K , a técnica de espectrometria gama é uma excelente alternativa para a análise radiométrica de amostras ambientais. Esta técnica garante a preservação da amostra, porque é um método não destrutivo, e, é possível analisar amostras simultâneas de diferentes tipos de chás. Alguns estudos já demonstraram a utilização dessa técnica para avaliação das amostras de chás, tais como:

SCHEIBEL & APPOLONI (2007), em seu trabalho de pesquisa no Paraná de níveis de radioatividade natural, analisou e comparou três diferentes tipos de fabricantes de chá mate por espectrometria gama, obtendo diferentes resultados de atividade específica para o

^{40}K nas três marcas analisadas. Os valores de atividade específica de uma amostra em relação a outra variou 100%. O objetivo do presente estudo foi medir níveis de radiação natural em amostras comerciais de chá mate produzido no Paraná, Brasil.

DESIDERE, MELI & ROSELLI (2010) fizeram uma pesquisa sobre radioatividade natural e artificial em plantas medicinais utilizadas na Itália, utilizando duas técnicas analíticas diferentes para determinar os radionuclídeos naturais e artificiais de interesse: espectrometria alfa para ^{238}U e ^{210}Po e espectrometria gama para ^{40}K , e ^{137}Cs . Em termos de mercado de ervas medicinais, é de grande importância determinar o nível de valores de radioatividade nestes produtos para garantir a segurança do consumidor. Os resultados obtidos em seu trabalho também fornecem uma informação útil para realizar uma avaliação da dose devido à ingestão de plantas medicinais.

A maior preocupação das entidades responsáveis pelo controle da radiação ionizante, entre eles, a *International Atomic Energy Agency* (IAEA) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), tem sido com a exposição externa devido à radiação gama. Neste contexto, a espectrometria gama de alta resolução tem sido utilizada largamente na determinação de radionuclídeos em amostras ambientais, pois é possível determinar os emissores gama diretamente da amostra, obtendo-se uma identificação qualitativa e quantitativa dos radionuclídeos presentes na amostra. Foi utilizado neste trabalho o detector de germânio hiper puro – HPGe devido a sua resolução em energia possibilitando a distinção de picos próximos.

A espectrometria gama é uma técnica analítica muito utilizada em laboratórios de medidas nucleares, pois possui vantagens significativas, como não destruir a amostra e por sua capacidade de analisar vários radionuclídeos, presentes nas amostras numa mesma medição. Os fótons, ao incidirem no detector e “perderem” sua energia nele, geram pulsos elétricos que são amplificados, analisados e registrados num espectro. A altura do pulso é diretamente proporcional à energia gama do fóton incidente no detector. Desta maneira, picos de absorção total são formados pela acumulação destes pulsos e o conjunto destes picos é o espectro de raios gama da amostra em questão. Nele é possível identificar o radionuclídeo do valor da energia do fóton. Suas atividades são proporcionais à área líquida de cada pico de absorção fotoelétrica do espectro gerado (KNOLL, 2000).

Este trabalho usou um arranjo experimental tradicional com um detector de alta resolução para radiação gama, dentro de uma blindagem de chumbo, que serve para reduzir a radiação de fundo, (*background*) ao máximo possível, ligado a uma fonte de alta tensão e acoplado a um pré-amplificador, na qual envia o sinal para o amplificador.

O presente trabalho traz resultados sobre atividades, limites mínimos de detecção e doses efetivas comprometidas a partir de diferentes amostras de chás analisadas e que estão presentes na alimentação diária da população brasileira, cujos dados são bastante escassos na literatura.

Portanto, o proposto neste trabalho é analisar algumas amostras secas de chás, reconhecendo a sua importância para o conhecimento dos níveis de radioatividade que o ser humano está exposto.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo determinar as concentrações específicas dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K e a Dose Efetiva para os diferentes tipos de chás. Para isso foram utilizados um espectrômetro gama de alta resolução equipado com um detector germânio hiperpuro (HPGe), tendo as seguintes etapas para obter os resultados desejados:

1. Aquisição e preparação dos diferentes tipos de amostras de chás;
2. Período de tempo para atingir o Equilíbrio Radiativo Secular; e
3. Uma metodologia alternativa para o cálculo da eficiência de detecção, onde a curva de eficiência é calculada usando o *software* de calibração matemática, baseada no método de Monte Carlo, *LabSOCS*, desenvolvido por *Canberra Industries*, que elimina a necessidade do uso de padrões radioativos certificado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RADIAÇÃO IONIZANTE NATURAL

A Radiação ionizante natural deve-se à presença de átomos radioativos existentes no meio ambiente. Essa radiação de fundo é proporcionada pela radiação da crosta terrestre, pelos radionuclídeos inalados, e incorporados e pela exposição à radiação cósmica. Ela se apresenta em forma de partícula atômica ou subatômica energética, tais como: partículas alfa, elétrons, prótons, pósitrons, nêutrons e outras que podem ser produzidos em aceleradores de partículas ou em reatores. As partículas alfa, os elétrons e os pósitrons são também emitidos espontaneamente, devido aos decaimentos radioativos. A radiação pode se apresentar também em forma de onda eletromagnética, constituída de campos oscilantes elétrico e magnético, perpendiculares entre si e que se propagam no vácuo com a velocidade da luz. A onda eletromagnética é caracterizada pelo seu comprimento e pela sua frequência e as faixas constituem o espectro eletromagnético, indo de ondas de frequência extremamente baixa, passando por ondas de TV, rádio, micro-ondas, radiação infravermelha, luz visível, radiação ultravioleta até chegar aos raios X e raios gama (KATHREN, 1998).

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

Tabela 1 - Componentes da radiação ionizante natural na dose efetiva anual

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

Fonte: UNSCEAR, 2000

A irradiação externa do corpo humano devido aos elementos primordiais se dá principalmente através da radiação gama dos elementos das séries radioativas naturais do Urânio, do Tório e do decaimento do Potássio-40. Outra série natural de grande importância é a do Actínio. Internamente, além da radiação gama, o corpo é irradiado pelas partículas

alfa e beta produzidas no decaimento destes elementos (UNSCEAR, 2000). A ingestão através dos alimentos e da água, além da via inalatória, constitui a principal via de incorporação de radionuclídeos no organismo. Como regra geral, os radioisótopos comportam-se da mesma forma que seus isótopos não radioativos com relação à absorção pelas raízes, e mesmo não tendo função metabólica podem estar presentes nos tecidos vegetais (EISENBUD, 1987).

Dentre os radionuclídeos, o maior responsável pela exposição à radiação natural e principal causador de câncer é o radônio. Ele está no mundo todo e o seu grau de concentração depende da presença de Urânio-238 na fonte. Ao ar livre, o radônio não é um risco importante para a saúde, porque se dilui no ambiente. No entanto, em uma concentração superior a (4pCi) por litro de ar, em ambiente fechado é uma concentração perigosa (EPA, 2013). O radônio inalado não se acumula no aparelho respiratório de uma pessoa, pois por ser um gás nobre é inspirado e expelido continuamente. Dessa forma, apenas uma pequena fração se difunde através dos alvéolos pulmonares diretamente para o sangue, sendo responsável por uma pequena dose depositada internamente ao corpo.

O risco radiológico associado ao radônio deve-se, sobretudo aos seus descendentes sólidos, tais como: polônio, bismuto e chumbo formados no ar e, que ao serem incorporados, irradiam os tecidos dos pulmões. Devido ao fato das meias vidas destes isótopos serem pequenas (não excedem alguns minutos), produz-se uma irradiação contínua nos pulmões em reduzido intervalo de tempo até ser atingido o nuclídeo estável (chumbo-206). Os danos provocados nos tecidos pulmonares pelas radiações emitidas por estes radionuclídeos podem induzir o desenvolvimento de câncer. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) estima que de 1 a 2 em cada 100 pessoas que, durante a vida inalem ar com concentrações de radônio não inferiores a 150 Bq.m^{-3} , incorram no risco de contrair câncer de pulmão (BOSTICK *et.al.*, 2002).

2.2 ELEMENTOS RADIOATIVOS

Há cerca de 4,8 bilhões de anos, diversos radionuclídeos estavam presentes na composição da massa original. Desde então eles vêm decaindo, e somente os radionuclídeos de meias vidas acima de 100 milhões de anos ou os radionuclídeos originários destes ainda existem na natureza, são os ditos radionuclídeos primordiais. Como exemplos há o ^{40}K (meia vida de 1,26 bilhões de anos), o ^{238}U (meia vida de 4,46 bilhões de anos) e o ^{232}Th (meia vida de 14,05 bilhões de anos).

Dentre os 340 nuclídeos encontrados na natureza, cerca de 70 são radioativos e

localizados principalmente entre os elementos mais pesados (EISENBUD, GESELL, 1997). Praticamente todos os materiais naturais contêm radionuclídeos em sua composição, geralmente em baixas concentrações. Assim, a água, os alimentos, o ar, e etc, os radionuclídeos estão presentes em toda parte.

A radiação de fundo existente é devida quase que exclusivamente aos radionuclídeos primordiais e seus descendentes, e pela radiação cósmica, sendo esta devido aos raios cósmicos que são produzidos através de processos existentes em nosso Sol, em outras estrelas, ou por eventos como explosões de supernovas, pulsares ou núcleos de galáxias ativas. A composição da radiação cósmica depende da faixa de energia observada sendo, de modo geral, formada por 79% de prótons, 15% de partículas alfa, e o restante de íons. Em uma proporção menor, fótons e elétrons de alta energia também fazem parte da radiação cósmica incidente (KATHREN, 1998). Quando estas partículas e fótons interagem com a matéria presente na atmosfera, há também a produção de partículas subatômicas e os chamados radionuclídeos cosmogênicos, sendo os principais: $^3\text{H}_1$, $^7\text{Be}_4$, $^{14}\text{C}_6$, $^{23}\text{Na}_{11}$ e $^{85}\text{Kr}_{36}$. Como quase todos os organismos vivos têm grande quantidade de carbono e hidrogênio, um pequeno percentual deles é radioativo (KATHREN, 1998).

2.3 RADIONUCLÍDEOS EM ALIMENTOS

As plantas são os receptores primários da contaminação radioativa da cadeia alimentar, seguido dos radionuclídeos da atmosfera. A vegetação está sujeita a contaminação direta e indireta. A contaminação direta refere-se à deposição dos materiais radioativos da atmosfera diretamente nas partes superficiais da planta e a contaminação indireta refere-se à porção dos radionuclídeos do solo a partir do seu sistema de raízes. Os receptores secundários da cadeia alimentar são os animais, que consomem as plantas ou outros animais. Ambas as plantas e produtos animais entram na dieta humana (UNSCEAR, 2000).

No primeiro período após a contaminação radioativa, o caminho dominante é a deposição direta na superfície das plantas. Para um longo período, a contaminação da dieta humana dependerá da absorção através das raízes das plantas. O processo de absorção dos radionuclídeos a partir do solo não depende somente da sua fisiologia, mas também dos processos no solo (UNSCEAR, 2000).

As principais características que afetam na transferência dos radionuclídeos do solo para as plantas através das raízes são: argila e conteúdo de matéria orgânica, Potencial Hidrogeniônico (pH) e capacidade de troca de cátions. Essas características do solo

interagem causando variações na transferência em diferentes circunstâncias, mas certas generalizações não são sempre válidas. Existem outros caminhos de transferência de radionuclídeos para a cadeia alimentar humana tradicional, e dependendo do radionuclídeo e do metabolismo do organismo, as concentrações podem aumentar ou diminuir, comparado aos primeiros passos da cadeia alimentar (UNSCEAR, 2000).

Cerca de vinte e quatro radionuclídeos, primordiais de linha gama única, estão identificados na literatura, sendo o potássio-40 o mais significativo por estar presente essencialmente em todas as amostras ambientais (KATHREN, 1998). Ele é encontrado em altos níveis na maioria dos solos, mas a sua disponibilidade para as plantas é baixa devido à grande porcentagem estar na forma insolúvel. O potássio encontra-se na forma acessível quando está preso às partículas de argila. Ele pode trocar de lugar com outros íons positivos na dissolução do solo. Esta é a forma mais fácil das plantas absorverem o potássio, porém é também a forma sujeita à lixiviação (BRADY, 1989).

Segundo a NORM (2014), o potássio é o sétimo elemento mais comum no solo, e a atividade específica média devido ao ^{40}K é de 850 Bq.kg^{-1} . No corpo humano o potássio-40 comporta-se como um nutriente essencial devido à semelhança com o potássio estável, sendo uniformemente distribuído nos tecidos musculares e sua concentração mantém-se constante devido o equilíbrio homeostático. O corpo de um ser humano de 70 kg (homem padrão caucasiano) contém aproximadamente 140 g de potássio, conseqüentemente a atividade do potássio-40 correspondente é de 3700 Bq, sendo responsável por um equivalente de dose anual no corpo humano de 0,17 mSv para adultos e de 0,19 mSv para crianças (UNSCEAR, 2000), e a maior contribuição no cálculo da dose é devido à radiação beta e não à radiação gama emitida.

Normalmente os seres vivos apresentam radioatividade natural maior que a radioatividade de fundo encontrada ao seu redor. Um dos motivos é a necessidade de potássio em seus organismos. Em plantas, o potássio é conhecido como um dos três “nutrientes primários” (junto com o nitrogênio e o fósforo). Por sua vez, em seres humanos, o potássio é o terceiro mineral mais abundante no corpo humano, atrás apenas do cálcio e do fósforo (KATHREN, 1998). Na Figura 1é mostrado o esquema de decaimento do ^{40}K .

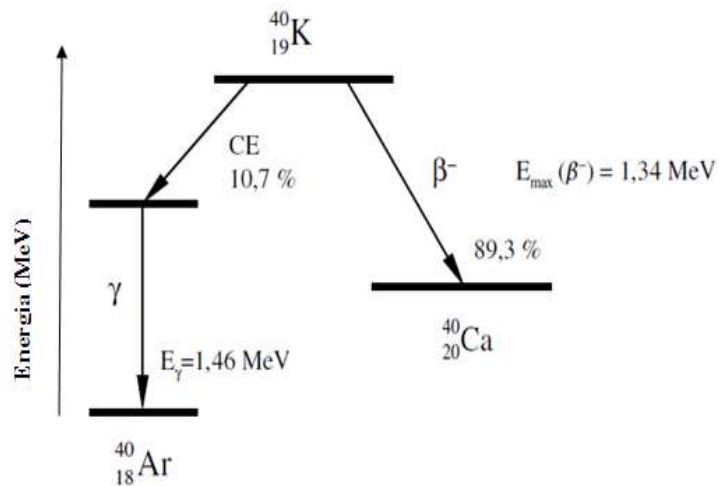


Figura 1 - Esquema de decaimento do ^{40}K para ^{40}Ar e ^{40}Ca .

2.4 RADIONUCLÍDEOS NO ORGANISMO

O potássio é um elemento básico, tanto no que se refere ao funcionamento e ao metabolismo interno de uma célula (transformado da glicose em glicogênio, síntese de proteínas, entre outros processos), é fundamental no que se refere aos mecanismos de equilíbrio dinâmico apresentado pelas membranas de uma célula. Juntamente com o sódio, o potássio tem papel fundamental no equilíbrio homeostático de uma célula. O potássio é essencial para a contratilidade da musculatura (lisa, esquelética e cardíaca) e para a excitabilidade do tecido nervoso (BIRAL, 2002).

Os metais alcalino-terrosos (Ba, Sr, Ra) possuem propriedades químicas semelhantes ao do cálcio, se depositando juntamente ao tecido ósseo e podendo ter um tempo de permanência no organismo relativamente longo. Encontrados na natureza em pequenas concentrações, esses elementos são normalmente incorporados ao corpo humano pela ingestão de alimentos, ou pela água que tenha parte de seu curso sobre depósitos minerais desses elementos. Muita atividade depositada nos ossos retorna ao plasma num período de alguns dias ou semanas, mas uma fração pode migrar para regiões dos ossos onde a transferência para o plasma acontece de maneira bem mais lenta. Nesses casos, a meia-vida efetiva associada aos ossos pode ultrapassar várias dezenas de anos (BIRAL, 2002).

O céσιο-137 apresenta comportamento químico semelhante ao do potássio, sendo prontamente absorvido pelo organismo, tanto pelo trato gastrointestinal como também por via respiratória. Assim como o potássio, dentro do corpo humano o céσιο se deposita uniformemente, preferencialmente nos músculos.

Na Tabela 2 tem-se a comparação entre a meia-vida física e a efetiva (a qual fornece o tempo de retenção do radionuclídeo no organismo) para os radionuclídeos de interesse.

Tabela 2 - Dados biocinéticos dos radionuclídeos de interesse.

Nuclídeo	Meia-vida física	Meia-vida efetiva	Fonte
^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$ a	30 d	ICRP, 1978
^{226}Ra	$1,60 \cdot 10^3$ a	No sangue: 5 d 54% - excretado prontamente No tecido ósseo: 1600 d	ICRP, 1989
^{228}Ra	5,75 a	No sangue: 5 d 53% - excretado prontamente No tecido ósseo: 30 d	ICRP, 1989

A quantificação desses radionuclídeos torna-se imprescindível para o monitoramento de contaminantes presentes em variados ambientes e produtos de consumo. Pode ainda, ser empregada como uma ferramenta para o controle de qualidade de diversos produtos do gênero alimentício, tais como os chás, a segunda bebida mais consumida mundialmente (FAO, 2016).

2.5 CHÁS

2.5.1 História, produção e comercialização

O chá teve origem no sudoeste da China, há cerca de 4000 anos, sendo cultivado desde a pré-história e inicialmente era usado no tratamento de várias doenças (WEISBURGER, 1997).

Chás que são obtidos de plantas jovens de *Camellia sinensis* constituem as bebidas mais consumidas mundialmente, depois da água. O seu reconhecido valor deriva das suas características de sabor, cheiro, baixo custo, benefícios para a saúde como tratamento primário de várias enfermidades e ainda às suas fortes associações culturais. Geralmente é consumido sob a forma de chá preto, Oolong ou verde, que são preparações originárias da planta *Camellia sinensis*, plantada em abundância na China e no sudeste asiático. O chá preto é um dos quatro tipos de chá produzidos a partir da planta *Camellia sinensis*, assim

como o chá branco, o chá verde, e o chá Oolong. Dentre os quatro tipos, o chá preto é o mais forte e o mais cafeinado, além disso, ele tem substância que ajuda no emagrecimento, aumentando a queima de gorduras. Ele também possui ação antioxidante, melhora o humor, protege o coração e previne doenças cerebrais degenerativas.

O chá preto é consumido predominantemente no ocidente (Europa e EUA) e em alguns países da Ásia e é a bebida quente mais consumida na Turquia. Já o chá verde é consumido majoritariamente na China, Japão, Índia, Norte de África e Médio Oriente (WEISBURGER, 1997).

No Brasil, o chá foi introduzido no estado do Rio de Janeiro no início do século XIX, com a vinda da corte portuguesa, a essa época o chá verde já era tão popular que D. João VI fez iniciar o plantio da *C. sinensis* para assegurar o seu abastecimento à corte. Porém, mais tarde, com o lucro proporcionado pela cultura do café, o plantio do chá foi desestimulado pelo próprio D. João VI (LIMA, 1997).

A cultura do chá da planta *C. sinensis*, introduzida no Rio de Janeiro por D. João VI, espalhou-se para Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Atualmente, a principal região produtora do chá no Brasil é o Vale do Ribeira, em São Paulo (SP), principalmente os municípios de Registro, Pariquera Açu e Cajati, sendo a colonização japonesa a grande responsável pela evolução e expansão dessa cultura na região de SP (TSUKAMOTO *et al.*, 1994).

No Brasil as infusões caseiras, ou “chá de ervas”, tornaram-se populares em todo o país através de uma grande parcela da população, por meio da cultura popular e das muitas ervas com propriedades medicinais. Essas ervas apresentam significativa capacidade antioxidante e potencial de utilização tanto na conservação da qualidade de alimentos, como na preservação da saúde humana, quando presentes regularmente na dieta. O que dá importância e justifica o fato de que, vários estudos *in vitro* vêm apresentando delineamento experimental com objetivo de avaliar as atividades antioxidantes em diferentes tipos de chás (TSUKAMOTO *et al.*, 1994).

2.5.2. Propriedades fisiológicas

O chá é a segunda bebida mais consumida no mundo depois da água e estudos laboratoriais e epidemiológicos têm indicado vários benefícios desse consumo para a saúde do consumidor. Os efeitos benéficos do chá são eficientes para a prevenção de doenças cardiovasculares, neoplasias, saúde dentária e consumo de ferro (nutriente essencial para o organismo humano) (AWASOM, 2011).

O chá, assim como a água, ajuda a manter o equilíbrio hidrolítico do corpo humano, contribuindo para a saúde geral do organismo, não contendo sódio, gordura, hidratos de carbono ou açúcar.

Outros estudos científicos também demonstraram a associação entre o consumo de chá e os marcadores para síndromes metabólicas em adultos levaram à conclusão que o consumo de chá quente está inversamente ligado à obesidade (diminuição do perímetro abdominal e do Índice de Massa Corporal (IMC)). O consumo de chá ainda revelou melhorias em bio marcadores de doenças cardiovasculares (aumento de lipoproteínas de alta densidade associadas a colesterol (HDL) e diminuição da proteína C reativa (PCR) (VERNARELLI & LAMBERT, 2012).

O chá, como qualquer outro tipo de produto alimentar plantado e processado, seja manualmente ou industrialmente, está sujeito a possíveis contaminações. A acumulação de radionuclídeos é estudada em diversos alimentos. No caso dos tecidos vegetais, como é o caso da planta *Camellia sinensis*, depende de vários fatores:

(1) a subespécie da planta, em que os radionuclídeos têm mais tendência a concentrar-se primeiramente nas raízes, evidenciando o papel crucial do sistema solo-planta na proteção da cadeia alimentar;

(2) fatores relacionadas com o solo, tanto o pH como a quantidade de matéria orgânica presente no solo;

(3) fatores externos, tais como: a temperatura, luminosidade, umidade, aplicação de agentes fertilizantes e protetores (MÍDIO, 2000).

Portanto, pouca informação existe na literatura sobre a concentração de atividade de radionuclídeos naturais que pertencem a séries radioativas naturais, bem como sobre a concentração de elementos estáveis em plantas usadas como alimentos e tratamento medicinal no Brasil. O conhecimento desses radionuclídeos pode ser útil para verificar possíveis interferências na atividade terapêutica, dependendo da sua concentração, mas eles também podem representar alguma ameaça para o ser humano (WHO, 1999).

2.5.3 Características morfológicas da *Camellia sinensis*

A *Camellia sinensis* é uma planta de pequeno porte, do tipo arbustivo que apresenta folhas simples, alternas, inteiras, com margem serrada e textura coriácea. As flores são pequenas, brancas e amarelas, geralmente com quatro a cinco pétalas e aparecem nas axilas das folhas em grupos de dois, três ou quatro, ver Figura 2. O fruto é uma cápsula com dois

ou três centímetros de diâmetro (LORENZI e MATOS, 2002).



Figura 2 -Flores e folhas de *Camellia.sinensis* .
Fonte: William C.W. 2007.

A caracterização da organização estrutural de folha e caule de *Camellia sinensis* contribui para a morfodiagnose da espécie. Caracteres anatômicos, como estômatos anomocíticos exclusivamente na face abaxial, tricomasectores unicelulares em ambas as superfícies, mesofilo dorsiventral, feixes vasculares colaterais, drusas de oxalato de cálcio e esclerides, permitem a identificação da folha que constitui a matéria prima vegetal. Tratando-se de insumo para a indústria de bebidas, somam-se às 18 características foliares as caulinares, a saber, bainha esclerenquimática, estrato de células de paredes espessadas em U, arranjo vascular colateral e medula heterogênea (DUARTE e MENARIM, 2006).

2.5.4 Legislação de chás no Brasil

Nos últimos anos, os chás têm atraído a atenção no meio acadêmico e científico, para estudos devido à quantidade de compostos bioativos e também sua abundância na dieta atual. Com esta demanda crescente, houve necessidade de estudos para a descoberta de novos princípios ativos, aplicações e funções, dentre eles o potencial antioxidante das infusões, sendo que estes podem substituir na íntegra ou parcialmente os antioxidantes sintéticos, na conservação de vários alimentos.

Segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), os chás são definidos como: “o produto constituído de uma ou mais partes de espécie(s) vegetal (is)

inteira(s), fragmentada(s) ou moída(s), com ou sem fermentação, tostada(s) ou não, constantes de Regulamento Técnico de Espécies Vegetais para o Preparo de Chás. O produto pode ser adicionado de aroma e ou especiaria para conferir aroma e ou sabor” (BRASIL, 2005).

A Resolução de Diretoria Colegiada (RDC) nº 267, de 22 de setembro de 2005, aprovou o Regulamento Técnico de Espécies Vegetais para o Preparo de chás, onde se encontram relacionadas 47 Espécies Vegetais para o Preparo de chás. Além disso, na resolução é reforçada a exclusão das espécies vegetais com finalidade medicamentosa e/ou terapêutica (BRASIL, 2005).

Percebe-se, por esta definição, que outras espécies, além da *Camellia sinensis*, são consideradas como chá no Brasil. Em complementação as espécies vegetais aprovadas pela Resolução nº 267, de 22 de setembro de 2005, foi aprovada a Resolução nº 219, de 22 de dezembro de 2006 da ANVISA, na qual foi realizada a inclusão do uso 13 das espécies vegetais e parte(s) de espécies vegetais para o preparo de chás relacionados na nº 267/2005 (BRASIL, 2005).

2.6 DECAIMENTO RADIOATIVO E RADIONUCLÍDEOS

Grande parte das espécies atômicas existentes na natureza sofre desintegração nuclear espontânea, com a emissão de uma ou mais partículas subatômicas ou radiação eletromagnética. Estas espécies, denominadas radionuclídeos, ocorrem largamente na natureza, são também produzidas artificialmente, como subproduto da utilização de combustível nuclear ou por meio de aceleradores de partículas. Existem vários tipos de decaimento radioativo. No presente trabalho, são abordados aqueles que resultam na emissão de radiação gama, emitida pelo núcleo atômico num estado excitado de energia metaestável ou imediatamente após a desintegração do núcleo com a emissão de uma partícula subatômica (KNOLL, 2010).

Ao buscar o equilíbrio nuclear, o ^{238}U emite radiações alfa, transformando-se no ^{234}Th que, sendo radioativo, emite radiações beta formando um novo elemento radioativo o ^{234}Pa , que decai no ^{234}U . Este processo continua por várias etapas, cujo núcleo formado é melhor organizado que o anterior, mas possui imperfeições que necessitam ser corrigidas por emissão de radiação. Isto forma uma família ou série de elementos radioativos, a partir do núcleo pai ^{238}U , terminando no isótopo ^{206}Pb , estável conforme é mostrado na Figura 3. Isto ocorre também com o ^{232}Th , que termina no ^{208}Pb , conforme é mostrado na Figura 4 (TAUHATA, 2014).

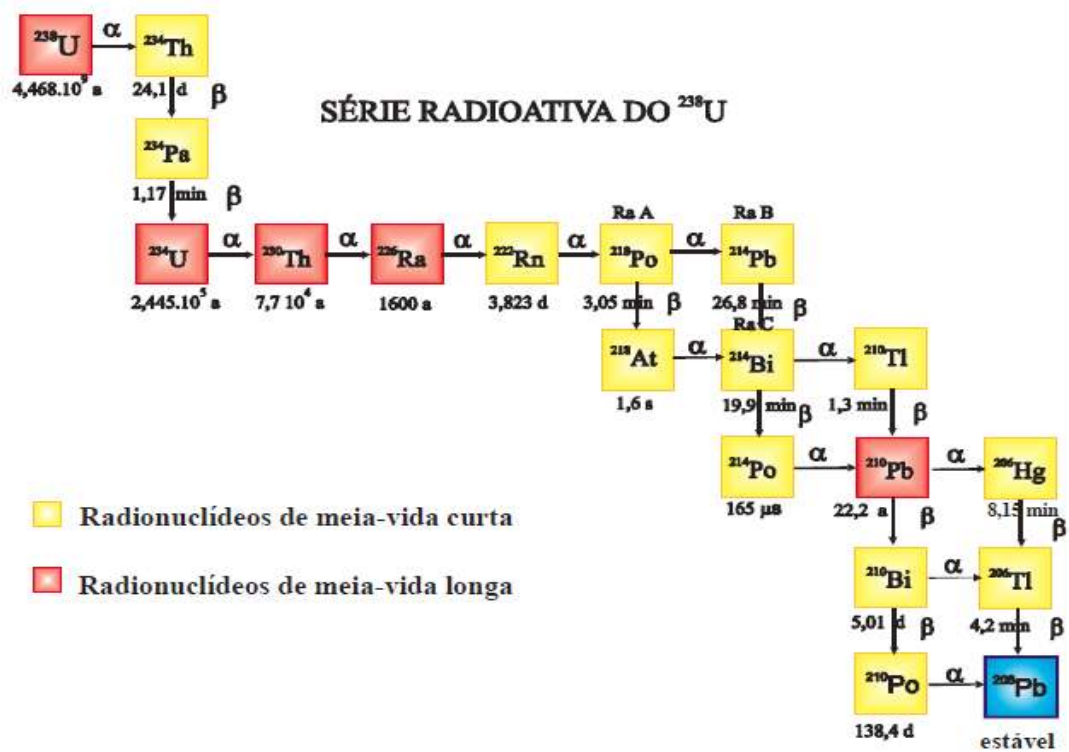


Figura 3- Série radioativa parcial do ^{238}U .
(TAUHATA, 2014).

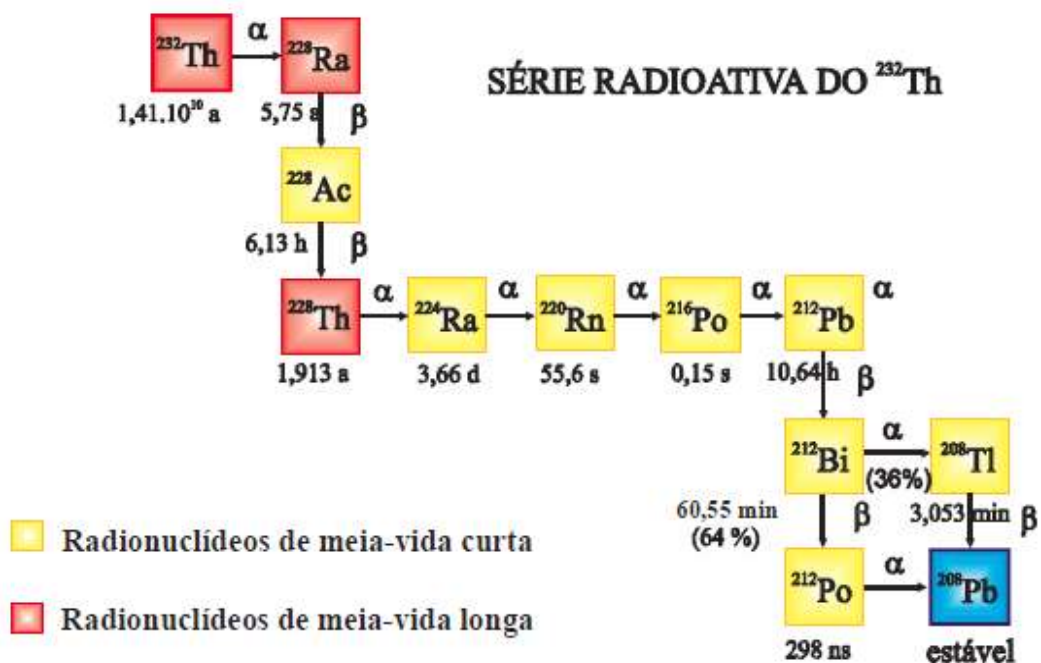


Figura 4 - Série radioativa do ^{232}Th .
(TAUHATA, 2014).

Os radionuclídeos presentes na atmosfera sofrem decaimento em trânsito ou são depositados na superfície da Terra através de deposição seca ou úmida. Os radionuclídeos são inicialmente depositados na camada superficial do solo, mas rapidamente se espalham no primeiro centímetro do solo, principalmente se forem depositados pelas chuvas. A erosão, e também o fato da superfície do solo não ser plana, reduz o campo de radiação aos níveis de referência geralmente usados de 1 m de profundidade. Outros mecanismos, como aragem e sedimentação podem reduzir as taxas de exposição (UNSCEAR, 2000).

Os radionuclídeos, sejam naturais ou artificiais, têm vasta aplicação técnica nas ciências exatas, ambientais, na engenharia e na medicina. Em todas estas áreas, existe a necessidade de se determinar a atividade de radionuclídeos em amostras dos mais diversos tipos e fins. Consequentemente é vasta a aplicabilidade da espectrometria gama de alta resolução, como técnica adequada para análise quantitativa de radioatividade (KNOLL, 2010).

2.7 EQUILÍBRIO RADIOATIVO SECULAR

Os radioisótopos do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th apresentam meias-vidas muito maiores do que qualquer um dos seus produtos de decaimento. Devido a isso, é possível que seja atingida a condição de equilíbrio secular, na qual as atividades de todos os membros da cadeia são iguais àquela do isótopo que é o primeiro da série. Entretanto, essa condição só ocorre se o sistema tenha permanecido fechado, ou seja, não tenha havido trocas químicas e físicas com o meio externo, durante um longo período de tempo (KETCHAM, 1996).

Uma vez que o tempo necessário para que um sistema fechado atinja 98,5% do equilíbrio é de cerca de seis vezes a meia-vida do membro que possui a menor constante de decaimento da série, pode-se considerar que a série do urânio entra em equilíbrio após um período de 1,5 milhões de anos, a do tório em 40 anos e a do actínio em 190.000 anos (KETCHAM, 1996).

Na série do urânio, o radionuclídeo de maior meia vida, excluindo o elemento pai, é o urânio-234 com meia vida de 250.000 anos, assim o equilíbrio secular da série é atingido após 1.700.000 anos, passado este período, se determinado a atividade específica de qualquer elemento, esta será a atividade de todos os elementos da série. Já na série do tório o elemento de maior meia vida é o rádio-228 com meia vida de 5,75 anos, assim para entrar em equilíbrio secular tem que se esperar em torno de 40 anos.

Esperar centenas de milhares de anos pelo equilíbrio secular de uma série não é viável, mas há a possibilidade de se considerar apenas alguns trechos destas séries. O tório-

234, por exemplo, possui meia vida curta e entra em equilíbrio secular com urânio 238 num período aproximado de 5 meses. Portanto, a atividade do tório-234, nessas condições, fornece a estimativa da atividade do urânio 238 (DOS SANTOS *et al.*, 2000).

Também é possível determinar a atividade do rádio-226 através da medição do bismuto-214 e/ou do chumbo-214, desde que o período de confinamento seja superior a 45 dias (tempo necessário para que o radônio-222 entre em equilíbrio com seus produtos de decaimento) (DOS SANTOS *et al.*, 2000).

2.8 DETECTORES DE RADIAÇÕES IONIZANTES

A detecção da radiação ionizante é o resultado da interação de partículas em algum meio sensível a esta radiação. Existem vários materiais que podem ser utilizados para a detecção de radiação ionizante, sendo os detectores mais utilizados os operados à gás, cintiladores e semicondutores. Cada um possui vantagens e desvantagens, a escolha pelo detector depende dos objetivos do trabalho. Para esse estudo foi utilizado um semicondutor. Os semicondutores funcionam a partir do princípio da excitação de elétrons, que passam das bandas de valência para a banda de condução, permitindo assim a coleção/coleta destes elétrons, dando origem ao processo de detecção (KNOLL, 2010).

É bom salientar que o pré-amplificador se encontra acoplado ao detector, uma vez que necessita de ser refrigerado à temperatura do nitrogênio líquido, para conseguir processar os pulsos de pequena amplitude e evitar os ruídos eletrônicos.

A principal vantagem do detector semicondutor está na energia média necessária para criar um par elétron-buraco que é cerca de 10 vezes menor do que a energia para criar um par elétron-íon em detectores gasosos, resultando numa maior resolução em energia. Outra vantagem está na densidade dos materiais, que é superior e por isso eles possuem um poder de frenamento (*stopping power*) maior do que os detectores a gás. A energia média para criar um par elétron-buraco a 77 K, é de 3,76 eV para o silício e de 2,96 eV para o germânio. O grande número de pares criados propicia duas vantagens aos detectores semicondutores sob o ponto de vista de resolução em energia: diminui a flutuação estatística e a influência do ruído eletrônico, levando a uma melhor relação sinal-ruído (KNOLL, 2010).

2.9 SISTEMA DE ESPECTROMETRIA

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

1. Detector HPGe;
2. Fonte de alta tensão para alimentar o detector que possibilita aplicar tensão de 0 – 5000V;
3. Amplificador que 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 para o detector com uma cavidade adequada para acomodar as amostras, construída basicamente por chumbo;
6. Microcomputador para colocação/instalação do MCA, instalação do programa computacional de gerenciamento do MCA e armazenamento dos dados.
7. O amplificador recebe um pulso de tensão tipo exponencial do pré-amplificador e produz um pulso de tensão de saída com forma gaussiana que é registrado no MCA. O MCA mede a altura do pulso (em mV) e largura da ordem de micro segundos originado no detector, que é proporcional à energia dos fótons. Um conversor analógico-digital no MCA converte o pulso de tensão em um número de canal. Cada canal corresponde a uma faixa estreita de tensão (mV). Conforme os pulsos de tensão vão chegando ao MCA, este vai guardando/registando na memória uma distribuição das contagens dos pulsos com respeito/relação à altura dos pulsos. Esta distribuição arranjada/arrumada em ordem crescente de altura de pulso (energia do raio gama detectado) devidamente analisado é chamada de espectro de energia (CROUTHAMEL *et al.*, 1970).

2.10 BLINDAGEM

As características da radiação de fundo do sistema de detecção são de grande importância, pois dele depende o limite mínimo de detecção. A radiação de fundo natural deve-se ao contínuo bombardeio de radiação que atinge a superfície terrestre, proveniente dos raios cósmicos e raios gama de fontes naturais e artificiais. Um exemplo é o potássio natural presente no concreto e em outros materiais de construção, que apresenta uma linha de 1460 keV bastante destacada no espectro (CURRIE, 1968).

A radiação de fundo do sistema tem influência determinante na qualidade do espectro adquirido pela espectrometria de raios gama, e por isso o sistema deve apresentar radiação de fundo tão baixo quanto for possível atingir. Então, para analisar amostras ambientais de baixa atividade é essencial realizar uma adequada blindagem do detector e da amostra para reduzir a radiação de fundo do ambiente no espectro da amostra (CARDOSO, 2012).

Existem blindagens padrões para uso em espectrometria de raios gama de amostras ambientais de baixa atividade. Essas blindagens são fabricadas com chumbo, mas outros

materiais de número atômico menor também fazem parte da blindagem para absorver os raios X derivados da interação dos raios gamas com o chumbo, diminuindo a sua incidência no detector.

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 os raios gama com energia na faixa de próximo a 0 eV a 2 MeV (AAECRE, 1980).

Atenção especial deve ser dada à blindagem do detector para garantir os cuidados supracitados. A blindagem ideal deve utilizar chumbo envelhecido, assim denominado, por ser isento de impurezas radioativas, principalmente as provenientes de precipitações de testes nucleares (*fallout*) realizados no período de 1944 a 2000.

Para blindagens com alto fator de atenuação, principalmente em relação às radiações do meio ambiente podem usar três camadas metálicas na sua composição.

1. A primeira camada externa é constituída de chumbo (blocos ou peça fundida) com 5 cm a 10 cm de espessura,
2. Uma segunda camada de revestimento interno com espessura cerca de 5 mm de cádmio,
3. E a terceira de cobre ou alumínio, com cerca de 2 mm de espessura.

A função da camada de cobre é atenuar os raios X característicos emitidos pela fluorescência do chumbo, com energias entre 72 keV a 87 keV, devido às interações com as radiações externas. A camada de cádmio é para atenuar estas radiações do chumbo ou do cádmio que, por sua vez, emitem raios X característicos com energias entre 22 keV e 27 keV. Esses raios X característicos são atenuados pelo cobre ou alumínio, que emitem raios X característicos de 8 keV, com muito baixa intensidade (CANBERRA, 2012).

2.11 CRIOSTATO E *DEWAR*

O criostato é uma parte importante do sistema de detecção, ele é responsável, porém capsular 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 FET vem selado pelo fabricante (KNOLL, 2010).

O contato entre o criostato e o *dewar* é feito através do “Dedo Frio” que é uma liga especial de cobre, mergulhado no nitrogênio líquido contido no *dewar* conectado ao cristal

por um acoplamento especial, evitando a transmissão de choque mecânico. Para absorver gases, principalmente O_2 e N_2 , que podem penetrar em 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 uma produção com enorme ruído. Pois, a contaminação da superfície acarreta o aumento na corrente de fuga do detector, e pode prejudicar a sua resolução em energia. A presença de água e outros contaminantes nas vizinhanças do detector geralmente será mais significativa 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).



Figura 5 - Dewars e criostatos

2.12 CALIBRAÇÃO EM ENERGIA

A calibração em energia é realizada através da aquisição de espectros de fontes de radionuclídeos conhecidas, fazendo a associação dos canais onde aparece esta linha de energia conhecida com sua respectiva energia, assim o analisador multicanal (MCA) consegue distinguir e classificar as energias de forma linear, sendo possível associar um

determinado canal a uma determinada energia, e conseqüentemente identificar o radionuclídeo.

A validação do sistema de detecção é realizada com padrões certificados, sendo responsável por aferir confiabilidade ao sistema de detecção. O processo da validação consiste na medição de um padrão, cuja atividade é conhecida.

2.13 ESPECTROMETRIA GAMA

A espectrometria gama de alta resolução é uma técnica não destrutiva que permite identificar e quantificar as concentrações de radionuclídeos emissores de radiação gama presentes em uma amostra e, além disso, se baseia na coleta e medida de cargas elétricas produzidas pela interação da radiação gama incidente sobre um cristal semicondutor de germânio de alta pureza (HPGe) (KNOLL, 2010).

Existe uma relação bem definida entre a energia cedida pelo fóton gama incidente e a carga liberada no cristal. O cristal é mantido em temperatura criogênica e alta tensão elétrica, o que permite a coleta da carga por meio de equipamentos eletrônicos apropriados. A carga coletada resulta em pulsos que, após amplificação, são classificados em canais de acordo com sua amplitude e gerando, após um tempo suficiente de medida, um espectro de altura de pulsos (BARG FILHO, 2000).

Uma vez que cada radionuclídeo emissor gama possui um espectro característico de energias de emissão, torna-se possível a identificação dos radionuclídeos presentes na amostra a partir da análise deste espectro (BARG FILHO, 2000).

2.14 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Atualmente existem programas para auxiliar na aquisição e análise dos dados experimentais. O Genie 2000 é um pacote de *softwares* de aplicação da *Canberra Industries*, desenvolvido para facilitar a aquisição e a posterior análise de espectros de radiação gama e alfa. Para isso, ele conta com dois módulos, um de definição de *hardware* de medição e outro de aquisição e processamento de dados. A parte dos *hardwares* de medição inclui toda parte de instrumentação para detecção e transmissão de dados, que detecta e converte um fóton num sinal digital. Como exemplo de *hardwares* tem-se a fonte de alta voltagem (HVPS – *High Voltage Power Supply*), o processador digital de sinal (DSP - *Digital Signal Processor*), o analisador multicanal (MCA) e outros. Já o módulo de aquisição e análise de dados é totalmente integrado, proporcionando uma interação com o usuário mais intuitiva (CANBERRA, 2012).

2.15 COMPOSIÇÃO DE GEOMETRIAS

O *software Geometry Composer* é usado para modelar geometrias de contagem, e combinado com os produtos do *software ISOCS* ou *LabSOCS*, permite ao usuário gerar uma curva de eficiência de detecção para uma geometria específica, sem a necessidade de uso de fontes radioativas (padrões). O *Geometry Composer* fornece uma interface que é intuitiva e simples de usar, que permite a entrada dos parâmetros da amostra e do porta-amostra, tais como: a geometria, as dimensões e o material, assim como a densidade da amostra, e outros dados como a distância da amostra ao detector.

O *ISOCS* ou *LabSOCS* da *Canberra Industries* são *softwares* matemáticos que calculam a curva de eficiência de detecção para todas as energias e provê ao usuário a capacidade de simular e fazer diversas medições com uma grande variedade de geometrias de contagem. O *software* possibilita criar calibrações em eficiência de detecção, sem o uso de fonte radioativa. Os *softwares* trabalham combinando um detector caracterizado pelo método de Monte Carlo, com modelos matemáticos que simulam diversas geometrias, e parâmetros físicos das amostras, tais como: a densidade e as moléculas majoritárias que fazem parte da sua composição (CANBERRA, 2012). Após a modelagem geométrica com inserção dos dados do recipiente e da amostra, o *software* calcula a eficiência de detecção para cada energia (45, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1000, 1400 e 2000 keV) pré-definida em uma lista, que são mostradas na Figura 9. Para tal, o *software* (*LabSOCS* ou *ISOCS*) divide toda a região fonte (porta-amostra e amostra) em 1024 de *voxels*, e de forma aleatória escolhe um ponto em cada *voxel* simula a passagem de fótons com as energias especificadas acima e calcula a eficiência de detecção já fazendo a correção devido à auto-atenuação/absorção sofrida pelos fótons simulados em seu percurso até o cristal do detector, em seguida o *software* soma todos os valores calculados nos *voxels*. Posteriormente, dobra o número de *voxel* faz todo o processo novamente, e obedecendo a critérios de convergência compara os valores, caso os valores de eficiência simulados não converjam, o número de *voxel* é dobrado novamente e o procedimento de simulação é repetido até que ocorra a convergência (CANBERRA, 2012). Com os valores de eficiência para estas energias definidos é criada uma curva de eficiência para esta geometria de porta-amostra. Uma das vantagens da simulação computacional é a correção na curva de eficiência de detecção devido à auto-atenuação sofrida pelos fótons na amostra e porta-amostra, além de outras como a correção devido ao efeito soma-coincidência que é feito no valor da atividade específica.

2.16 PROGRAMA ANÁLISES GAMA

No *software* Análise Gama (*Gamma Analysis Software*) está incluso um conjunto de algoritmos de análise avançada para o processamento de espectros adquiridos e armazenados pelo Analisador Multicanal.

Os algoritmos de análise gama, as bibliotecas e os arquivos são acessíveis a partir da tela de interface com o usuário. A execução da análise utiliza dados em arquivos CAM (*Configuration Access Method*), nativos para todos os sistemas da família Genie 2000. Os resultados de cada algoritmo também são armazenados em arquivos CAM, fazendo com que os dados resultantes de uma análise fiquem registrados podendo ser analisados posteriormente.

Como o módulo de aquisição e análise de dados é totalmente integrado, as análises dos espectros são obtidas sem muitas dificuldades com o auxílio do *software Gamma Analysis*, que podem ser executadas numa sequência pré-definida pelo usuário ou, construída etapa por etapa. O primeiro tópico é a utilização da curva de eficiência de detecção para cada energia no seu espectro gama, para esta amostra Além deste, os outros tópicos importantes para as análises são a subtração da radiação de fundo, lembrando que o *software* também desconta o fundo contínuo de radiação (fundo Compton) que aparece sob os picos, a localização dos picos, a quantificação das áreas líquidas (sem o fundo contínuo de radiação), a correção da eficiência (também gerada pelo *LabSOCS* ou *ISOCS*), a identificação dos radionuclídeos presentes, a correção devido ao efeito soma- coincidência, e por fim o cálculo das atividade específicas e dos valores de MDA's (*Minimum Detectable Activities*).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. AQUISIÇÃO DAS AMOSTRAS

As 24 amostras de chás analisadas neste trabalho foram obtidas no comércio formal de rua na Cidade do Rio de Janeiro e estão listadas na Tabela 3. As amostras utilizadas foram obtidas na forma seca.

Tabela 3- Dados das amostras de chá analisadas e seus usos medicinais.

Amostra	Nome científico	Parte analisada da amostra	Usos medicinais
Capim limão	<i>Cymbopogon citratus</i>	Folhas	É usado medicamento como: antibacteriano, calmante, diurético, antiespasmódico, analgésico, expectorante, antidepressivo, digestivo, desinfetante e é um ótimo repelente de insetos (SIMÕES, 2010).
Espinheira Santa	<i>Maytenus ilicifolia</i>	Folhas	É usado medicinalmente para: dores de estômago, gastrite, úlcera, azia e queima (SIMÕES, 2010).
Panacéia	<i>Gomphrena arborescens</i>	Folha e flor	É usado medicinalmente para problemas renais (SIMÕES, 2010).
Boldo	<i>Peumus boldus</i>	Folhas	É usado medicamento para: melhorar o funcionamento do fígado, auxiliar na digestão e funcionamento do sistema digestivo e redução da azia (LOPES, 2010).
Quebra Pedra	<i>Phyllanthus Niruri</i>	Folhas	É usado medicamento para: É diurético e antibactericida (SIMÕES, 2010).
Chá Verde	<i>Camellia sinensis</i>	Folhas	É usado medicinalmente para combater o colesterol (SIMÕES, 2010).
Artemisia	<i>Artemisia vulgaris</i>	Folhas	É usada medicinalmente para prevenir enxaquecas e controlar dores de cabeça crônicas (SIMÕES, 2010).
Mate	<i>Ilex paraguariensis</i>	Folhas	É usado medicinalmente como: Anti-reumático, diurético, estimulante e laxante (SIMÕES, 2010).
Chá preto	<i>Camellia sinensis</i>	Folhas	Previne doenças cardíacas e melhora o coração (SIMÕES, 2010).

Pata de vaca	<i>Bauhinia forficata</i>	Folhas e galhos	É usado medicinalmente no tratamento da diabetes (LOPES, 2010).
Avenca	<i>Adiantum capillus-veneris</i>	Folhas e galhos	É muito útil no tratamento de tosse, resfriado, gripe, afecções brônquicas e rouquidão (SIMÕES, 2010).
Erva de são João	<i>Hypericum perforatum</i>	Folha e flor	É usado medicamento como: Cura feridas e úlceras e queimaduras na pele (SIMÕES, 2010).
Camomila	<i>Matricaria recutita</i>	Flor	Ele é usado medicamente como: Ajuda a calma e relaxa, Alivia o estresse, Ajuda a aliviar o enjôo, alivia as cólicas menstruais, Calma e remove as impurezas da pele (LOPES, 2010).
Erva Cidreira	<i>Melissa officinalis</i>	Folhas	É usada medicinalmente como: antiespasmódica, antinevrálgica e como calmante (LOPES, 2010).
Erva Doce	<i>Pimpinella Anisum</i>	Sementes e Folhas	Ele é usado medicamente como: Calmante, combate a insônia, náuseas, cólicas e vômitos (LOPES, 2010).
Picão	<i>Bidens pilosus</i>	Folhas	É usado medicinalmente no tratamento de alergias, amigdalite, asma, boca amarga, bronquite, gastroenterite e hepatite (SIMÕES, 2010).
Hortelã	<i>Mentha piperita</i>	Folhas	É usado medicinalmente no tratamento de resfriados, para acalmar e aliviar o estresse (SIMÕES, 2010).
Guaco	<i>Mikania glomerat</i>	Folhas	É usado medicinalmente como: Expectorante, tosse, bronquite e resfriados (SIMÕES, 2010).
Tansagem	<i>Plantago major</i>	Folhas e galhos	É usado como ajuda à cura, ajuda a lutar contra a diarreia, problemas gastrointestinais e dores de dente (SIMÕES, 2010).
Alfavaca	<i>Ocimum basilicum</i>	Folhas	É usado medicamento para: crises renais, constipação, aftas, bronquite e vômito (SIMÕES, 2010).
Melissa	<i>Melissa officinalis</i>	Folhas e galhos	É usado medicinalmente na cura da insônia e do estresse (SIMÕES, 2010).
Bardana	<i>Arctium lappa</i>	Folhas e galhos	É amplamente utilizado no tratamento de problemas dermatológicos, como acne ou eczema (SIMÕES, 2010).

3.1.1. Tratamento das amostras

As amostras de chás foram moídas em um moinho manual da marca Botini (como mostrado na Figura 6) até se obter um pó fino homogêneo.



Figura 6- Moinho manual marca Botini.

Entre uma amostra e outra, foi usado como solvente o arroz branco sugerido pelo fabricante e por apresentar menor atividade de ^{40}K , conforme a descrição na Tabela 4. Após a limpeza e higienização do referido aparelho, a primeira moenda foi descartada para evitar qualquer detrito da amostra anterior ou mesmo do material utilizado para limpeza do equipamento. As amostras moídas foram peneiradas com uma peneira de 16 mesh.

Tabela 4- Atividade específica do material utilizado como solvente.

Amostra	^{40}K (Bq/kg)
Arroz Branco	26 ± 3
Arroz Parbonizado	38 ± 3
Arroz Integral	67 ± 5

As amostras dos diferentes tipos de chás foram submetidas ao processo de secagem durante seis horas em uma estufa a 60°C até obter massa constante, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5- Tempo de secagem das amostras de chá.

Tempo de secagem (h)	Massa da amostra antes	Massa da amostra depois
	da secagem (g)	da secagem (g)
1	51,76	50,51
2	50,51	50,32

3	50,32	50,22
4	50,22	50,05
5	50,05	49,99
6	49,99	49,91
7	49,91	49,91
8	49,91	49,91

O valor da massa seca foi utilizado para determinar a concentração de radionuclídeos. O material foi colocado em um recipiente de polipropileno de 200 ml (Figura 7) de baixa radiação de fundo. As tampas dos potes foram lacradas com o uso de cola quente para evitar qualquer contato externo, ou seja, que não entre umidade nos recipientes. Logo em seguida as vinte e quatro amostras de chás foram armazenadas em local próprio no Laboratório de Análise Ambiental e Simulação Computacional (LAASC) por um período de 45 dias para que as atividades dos radionuclídeos de interesse atingissem a condição de equilíbrio radioativo secular.



Figura 7 - Potes lacrados contendo amostras de chá.

Para aferir as massas das amostras, foi utilizada uma balança digital da marca Gehaka, modelo BG 4000, com sensibilidade de $\pm 0,01$ g (Figura 8). A aplicação das técnicas analíticas por espectrometria gama para determinação dos radionuclídeos naturais e

artificiais para o ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K foi realizada no Laboratório de Análise Ambiental e Simulação Computacional do Programa de Engenharia Nuclear do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – LAASC/PEN/COPPE/UFRJ.

Todas as amostras possuem a mesma geometria, mas com densidades diferentes assim como os diferentes tipos distintos de chás, o que implica a necessidade de usar o programa *Geometry Composer* para cada amostra, uma vez que diferentes densidades resultam em diferentes valores para a correção de absorção dos fótons em cada amostra, ou seja, cada tipo de chá possui uma curva de eficiência de detecção.



Figura 8- Balança de precisão utilizada para a medição das massas das amostras.

3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a obtenção dos espectros de radiação gama dos radioisótopos naturais contidos nas amostras coletadas, foi utilizado um espectrômetro da marca Canberra, com detector de germânio coaxial de alta pureza (HPGe), modelo GC3020, com eficiência relativa de 30%, com resolução em energia de 1,82 keV para o pico de 1332,5 keV de ^{60}Co . Este valor é bem próximo ao valor nominal (1,81 keV) para a mesma energia, apresentada pelo fabricante. O cristal de germânio é do tipo coaxial, com 62 mm de diâmetro e 40 mm de altura.

Foi utilizada uma blindagem de baixa radiação de fundo da marca Canberra, modelo

747E com espessura de 10,16 cm de chumbo, com a parte interna recoberta com 1 mm de espessura de estanho, 1,6 mm de espessura de cobre e recoberta externamente por 9,5 mm de espessura de aço com baixa porcentagem de carbono. Apresenta uma cavidade com diâmetro interno de 27,9 cm por 30,5 cm de profundidade, conforme Figura 9.

O pré-amplificador está associado ao criostato vertical, modelo 7500SL-DRC-4, e um *dewar* com uma capacidade de 30 L. O sistema multi-canal utilizado é o DAS 1000 (Digital Spectrum Analyzer), com 8192 canais e uma energia que varia de 50 keV a 2 MeV, amplificando o pulso de formato Gaussiano, com um aumento rápido de 8,8 μ s do pré-amplificador. A tensão utilizada para a formação da área de depleção foi no máximo de 4500 V.

A geometria usada para a colocação das amostras foi um pote de polipropileno com baixa radiação de fundo, com capacidade volumétrica de 200 ml, conforme é ilustrado na

Figura 9. As dimensões da garrafa e a altura da amostra foram fornecidas para o *software* Genie-2000 para calcular o volume da amostra. O cálculo da densidade da amostra foi a proporção da massa medida na balança e do volume do frasco calculado pelo software.

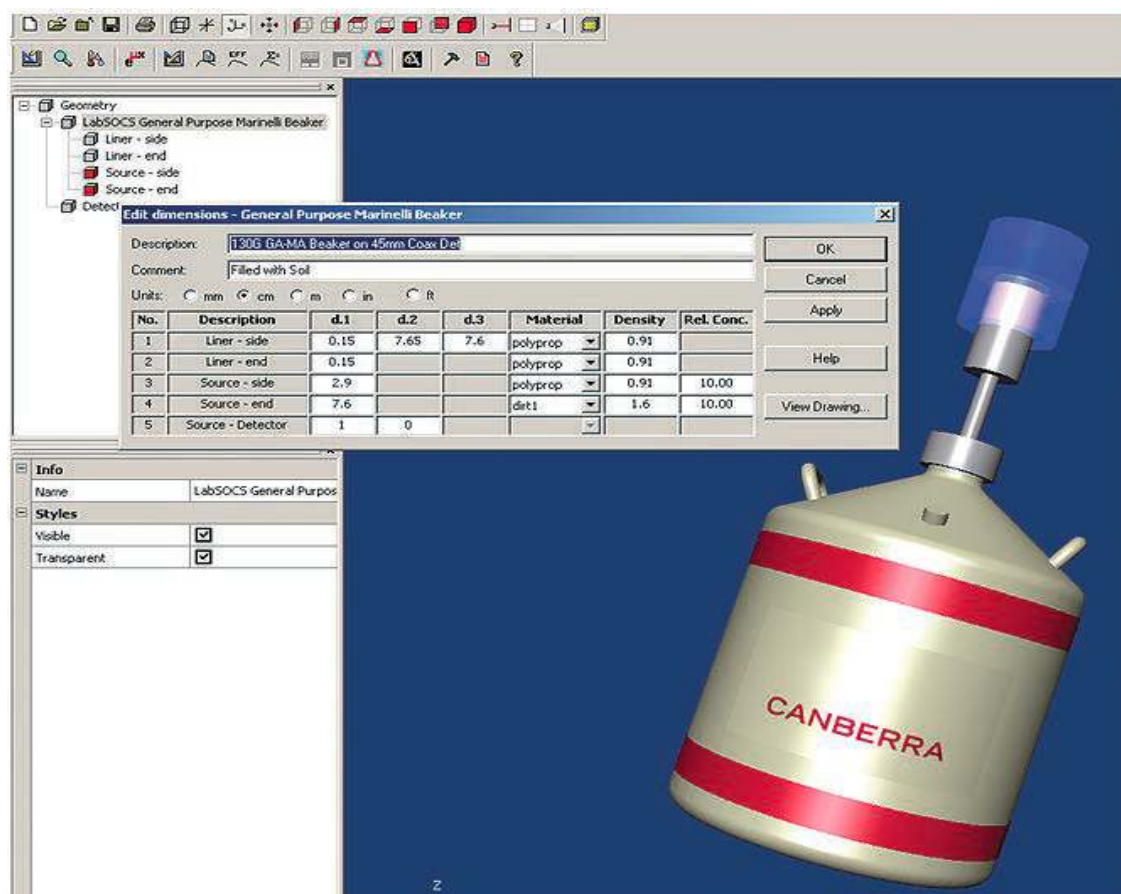


Figura 9- Geometria do pote de 200 ml de polipropileno para colocação da amostra.

3.3 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE DETECÇÃO

A calibração em energia foi realizada com o auxílio do *software* Gamma Analysis do Genie 2000, que relaciona a informação obtida pelo analisador multicanal com unidades de energia (eV, keV, etc), através de um ajuste linear, se forem usadas apenas para duas linhas de energia ou através de um ajuste quadrático, se forem usadas para três ou mais linhas de energia. A calibração em energia do sistema foi feita com três fontes radioativas certificadas (európio, césio e cobalto) totalizando um número de cinco pontos experimentais correspondente aos picos do ^{152}Eu (0,1218 MeV e 0,3443 MeV), ^{137}Cs (0,6617 MeV) e ^{60}Co (1,17 MeV e 1,33 MeV).

Com a calibração em energia, tornou-se possível a identificação dos radionuclídeos presentes nas amostras e, portanto, suas áreas líquidas para cada fotopico de interesse, em contagens, por meio da aquisição dos espectros pela eletrônica associada. Com essa informação as contagens obtidas da amostra medida em atividade puderam ser convertidas

A validação experimental foi realizada por meio de uma ampola contendo uma solução líquida produzida e certificada (nº da solução líquida: 65L15, nº do certificado: C/036/A15) pela Divisão de Metrologia (DIMET) do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI/IRD/CNEN).

3.4 DETERMINAÇÃO DO ^{226}Ra , ^{228}Ra E ^{40}K

A atividade de um dado radionuclídeo depende de vários fatores e é calculada pelos parâmetros anotados na Equação 1 (IAEA,1989):

$$A_{\text{esp}} = \frac{N_L}{\varepsilon \cdot m(\text{kg}) \cdot t(\text{s}) \cdot P_\gamma} \quad (1)$$

Onde:

A_{esp} é a atividade específica calculada para um determinado fotopico ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$),

N_L é a área líquida do fotopico na energia E ,

m é a massa da amostra analisada (kg),

ε é a eficiência detectada para a energia E ,

P_γ é a probabilidade de emissão do raio gama medido e

t é o tempo de contagem (s).

As atividades específicas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K , que são os radionuclídeos de

interesse neste estudo, foram determinadas usando as linhas de emissão de: 1120 keV, 911 keV e 1460,8 keV, respectivamente.

A área líquida de contagem é a quantidade total de contagens sob a área do pico de energia de interesse descontado o fundo Compton, adquirido por unidade de tempo, e a radiação de fundo (porta-amostra + blindagem). O número de contagens depende da eficiência de detecção que, por sua vez, depende da energia dos fótons. A quantidade de radiação que chega ao detector depende das dimensões e da densidade da amostra. Por isso, foi tomado o devido cuidado de utilizar sempre a mesma geometria e o mesmo volume. O tempo de contagem (tempo vivo), utilizado para o levantamento dos espectros de *background* e das amostras foram de 30.000 segundos.

3.4.1 Incerteza dos valores na atividade específica

A incerteza associada à Equação 1 pode ser estimado utilizando a propagação de erros apresentado na equação (2):

$$\delta A = \sqrt{\frac{\delta N_L^2}{(m \cdot \varepsilon \cdot t \cdot P_\gamma)^2} + N_L^2 \left(\frac{\delta \varepsilon^2}{(m \cdot \varepsilon^2 \cdot t \cdot P_\gamma)^2} + \frac{\delta m^2}{(m^2 \cdot \varepsilon \cdot t \cdot P_\gamma)^2} + \frac{\delta t^2}{(m \cdot \varepsilon \cdot t^2 \cdot P_\gamma)^2} \right)} \quad (2)$$

Onde: δA é a incerteza na atividade específica;

δN_L : a incerteza na área do fotopico;

$\delta \varepsilon$: a incerteza na eficiência de detecção;

δm : a incerteza na massa da amostra;

δt : a incerteza na medida do tempo de aquisição do espectro gama; e

δP_γ : a incerteza na probabilidade de emissão de raios gama (δ) foi ignorada porque a probabilidade de decaimento foi considerada absoluta.

3.4.2 Correções na atividade específica

Visando a obtenção dos valores com a máxima precisão possível, é necessário fazer correções nos valores das atividades específicas. Algumas destas correções são feitas pelo programa Genie 2000. A primeira delas trata-se de uma correção intrínseca, que é a correção devido à auto-atenuação dos fótons na amostra e no porta-amostra feita toda vez que a curva de eficiência de detecção é gerada pelo programa LabSOCS.

A segunda correção é feita pelo *Gamma Analysis Software*, que é devido ao efeito soma-coincidência, ou efeito cascata, que ocorre quando um elemento radioativo emite dois fótons num curto intervalo de tempo, tal que a eletrônica do detector não consegue distingui-los e registra como único fóton somando, assim, as suas energias. Este efeito aumenta à medida que a distância fonte-detector diminui apresentando, portanto, forte dependência com a geometria utilizada. A terceira e última correção, também feita pelo *Gamma Analysis Software*, se dá na curva de eficiência de detecção, baseada nas áreas líquidas de cada pico.

3.5 LIMITE MÍNIMO DE DETECÇÃO

Para a maioria das aplicações de medidas de baixo nível de radiação, é imprescindível definir um limite de detecção para uma dada emissão em estudo.

O limite mínimo de detecção de um espectrômetro de raios gama é a medida de sua habilidade em detectar raios gama na presença de interferência da radioatividade natural e do espalhamento Compton de raios gama de alta energia originados na fonte, e dependerá do tipo de amostra, da energia da radiação, da geometria de contagem, do tipo de detector, do fundo do sistema e do tempo de medida.

O cálculo da atividade mínima detectável por unidade de massa da amostra para um dado radionuclídeo, com um nível de 95% de confiança, é usualmente baseado na derivação de Curie, e está de acordo com as normas ISO 11929 (ISO, 2010) e ISO 10703 (ISO, 2007). A fórmula utilizada pelo programa *Gamma Analysis* para o cálculo do MDA (*Minimum Detectable Activity*) é expressa pela Equação 3:

$$MDA = \frac{2,71 + 4,66 \cdot \sigma}{F_{\gamma} \cdot t(s) \cdot m(kg) \cdot \epsilon} \quad (3)$$

Onde:

σ é o desvio padrão da radiação de fundo da blindagem mais o porta-amostra medido por um tempo t .

Foi calculado o valor de MDA de cada radionuclídeo de interesse, em todas as amostras analisadas neste estudo.

3.6 CÁLCULO DA DOSE EFETIVA

Para estimar a taxa de dose efetiva anual, foi utilizada a atividade específica em ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) de um determinado radionuclídeo que fora ingerido em uma certa porção nas amostras de chá, o que permitiu calcular a dose efetiva comprometida em $\text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$. Para tal, usa-se o fator de transferência para ingestão (fI) recomendado pela Publicação ICRP 72 (1996), cujos valores foram atualizados na Publicação ICRP 119 (2012). Para o ^{40}K , os fatores foram obtidos considerando a emissão do elétron (decaimento β^-) e do fóton. No caso dos elementos das séries do ^{238}U e do ^{232}Th , foram consideradas todas as formas de decaimentos dentro do corpo humano, cuja principal via de incorporação é pela ingestão de alimentos. Uma vez no trato gastrointestinal, estes são absorvidos integralmente ou parcialmente.

Para o cálculo de dose efetiva foi utilizado o ^{40}K por este radionuclídeo apresentar a maior atividade. Na Tabela 6 são mostrados os coeficientes de dose efetiva comprometida para vários radionuclídeos.

A dose efetiva para cada amostra de chá analisada foi obtida por meio da Equação 4.

$$E = A_{esp} * m * e \quad (4)$$

Onde:

E é a dose efetiva (Sv),

A_{esp} é a atividade específica do radionuclídeo (Bq/kg),

m é a massa (kg),

“ e ” é o coeficiente de dose efetiva para ingestão de radionuclídeos para membros do público ($\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$).

Para o cálculo de dose efetiva, foi estimado que uma pessoa consome em média 1 kg de chá por ano. Além disso, foi considerado também que todo o radionuclídeo seja transferido no processo de infusão para o chá. Esses dados mencionados facilitam o entendimento e a aplicação no cálculo de dose efetiva anual.

Tabela 6- Coeficientes de dose efetiva (e) por unidade de ingestão para membros do público (Publicação ICRP 119 (Corrigenda), 2012).

Nuclídeo	$T_{1/2}$	f_I	$e(\text{Sv.Bq}^{-1})$				
			1 ano	5 anos	10 anos	15 anos	Adulto
^{40}K	$1,28 \times 10^9$ anos	1,0	$4,20 \times 10^{-8}$	$2,10 \times 10^{-8}$	$1,30 \times 10^{-8}$	$7,60 \times 10^{-9}$	$6,20 \times 10^{-9}$
^{226}Ra	1600 anos	0,6	$9,60 \times 10^{-7}$	$6,20 \times 10^{-7}$	$8,00 \times 10^{-7}$	$1,50 \times 10^{-6}$	$2,80 \times 10^{-7}$
^{228}Ra	5,75 anos	0,6	$5,70 \times 10^{-6}$	$3,40 \times 10^{-6}$	$3,90 \times 10^{-6}$	$5,3 \times 10^{-6}$	$6,90 \times 10^{-7}$

Fonte: ICRP 119 (2012)

f_I - Absorção fracional (Fator de transferência do radionuclídeo do trato gastrointestinal para o sangue).

e – coeficiente de dose efetiva

Para estimar a taxa de dose efetiva anual, conforme mencionado foi utilizado o fator de transferência para ingestão (f_I) recomendado pela Publicação ICRP 72 (1996), cujos valores foram atualizados na Publicação ICRP 119 (2012) e os valores utilizados pela Posição Regulatória (PR) da norma (CNEN-NN-3.01), Diretrizes Básicas de Proteção Radiológicas, por esta seguir a mesma recomendação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo, vinte e quatro amostras de chá foram analisadas utilizando espectrometria gama para aferir as concentrações específicas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K . Foi calculado os valores de dose efetiva para ingestão para os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K . Todas as amostras avaliadas para o ^{40}K apresentaram valores superiores à atividade mínima detectável (MDA). Para o ^{226}Ra , das vinte e quatro amostras analisadas, onze não apresentaram valores de concentração específica e treze apresentaram valores de concentração de atividade específica abaixo do limite mínimo detectável (MDA). Já o ^{228}Ra , das 24 amostras analisadas 06 não apresentaram valores de concentração específica e 18 apresentaram valores de atividade específica superiores à atividade mínima detectável (MDA). Os valores máximo, mínimo e médio do MDA obtidos neste estudo são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7- Valor de MDA para o ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K nas amostras analisadas.

	MDA (Bq.kg ⁻¹)		
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{40}K
Mínimo	4	1	13
Máximo	27	7	39
Média	11	2	27

Os valores de atividade específica e a dose efetiva para ingestão de ^{40}K são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8- Atividades específicas e dose efetiva de ^{40}K para amostras de chá.

Amostra	Nome	^{40}K (Bq.kg ⁻¹)	($\mu\text{Sv.ano}^{-1}$)
A1	Capim Limão	184 ± 56	1,14
A2	Espinheira Santa	223 ± 12	1,38
A3	Panacéia	229 ± 13	1,42
A4	Boldo	293 ± 13	1,82
A5	Quebra Pedra	400 ± 18	2,48
A6	Chá Verde	421 ± 17	2,61
A7	Artemisia	430 ± 19	2,67
A8	Mate Industrializado	447 ± 20	2,77

A9	Mate	451 ± 17	2,80
A10	Chá Preto	464 ± 20	2,88
A11	Pata de Vaca	498 ± 22	3,09
A12	Avenca	529 ± 29	3,28
A13	Erva de São João	562 ± 24	3,48
A14	Camomila	603 ± 23	3,74
A15	Erva Cidreira	625 ± 29	3,88
A16	Camomila Industrializada	680 ± 29	4,22
A17	Erva Doce	683 ± 29	4,23
A18	Picão	704 ± 28	4,36
A19	Hortelã	732 ± 30	4,54
A20	Guaco	752 ± 29	4,66
A21	Tansagem	774 ± 35	4,80
A22	Alfavaca	893 ± 33	5,54
A23	Melissa	1004 ± 35	6,22
A24	Bardana	1087 ± 40	6,74

4.1 ATIVIDADES ESPECÍFICAS DE ^{40}K NAS AMOSTRAS DE CHÁS

Os valores de concentração específica para o ^{40}K estão em ordem crescente e variaram entre $184 \pm 56 \text{ Bq.kg}^{-1}$ para o Capim Limão (*Cymbopogon citrates*) (A1) até $1087 \pm 40 \text{ Bq.kg}^{-1}$ para a Bardana (*Arctium lappa*) (A24).

Para os valores de concentração de atividades específicas para o ^{40}K , enquanto média das atividades específicas encontradas neste trabalho resultaram em $561,2 \pm 26 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Vale à pena mencionar que o potássio, assim como o seu isótopo radioativo, o ^{40}K , se encontram em equilíbrio homeostático no organismo, sendo que a sua assimilação ou retenção não se encontra sujeita unicamente à quantidade inicialmente ingerida (BIRAL, 2002).

Os valores médios de concentração de atividade de ^{40}K nas amostras de chás foram bem mais elevados do que os valores de atividade dos radionuclídeos naturais das séries do ^{238}U e ^{232}Th . Esse fato era de se esperar, visto que o ^{40}K é um isótopo do elemento K, um macro-nutriente indispensável às plantas. Além disso, a adição de potássio aos solos através

dos fertilizantes pode aumentar as concentrações de potássio nas plantas (UNSCEAR, 2000).

4.1.1 Dose efetiva para o ^{40}K

As doses efetivas para o ^{40}K estão em ordem crescente e variaram de $1,14 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ para o Capim Limão (*Cymbopogon citrates*) (A1) até $6,74 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ para a Bardana (*Arctium lappa*) (A24). Os valores apresentados neste estudo foram inferiores à média anual de dose efetiva de ingestão para adultos que é de $2,42 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ (UNSCEAR, 2000).

4.2 ATIVIDADE ESPECÍFICA E DOSE EFETIVA PARA O ^{226}Ra E ^{228}Ra EM AMOSTRAS DE CHÁ

As atividades específicas para o ^{226}Ra foi dada pela media ponderada da atividade do ^{214}Bi , verificando-se que a linha gama mais presente em todas as amostras foi a de 1120 keV . Todavia, para o ^{228}Ra , a atividade específica foi calculada a partir das emissões de $911,2 \text{ keV}$ do ^{228}Ac . Para o ^{226}Ra , 11 amostras não apresentaram atividades específicas e 13 amostras ficaram abaixo do MDA, variando de < 4 a $< 27 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Para o ^{228}Ra , 06 amostras não apresentaram atividades específicas e 18 amostras ficaram acima do MDA, variando de 2 ± 1 para o Guaco (*Mikania Glomerat*) a $27 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ para o Capim Limão (*Cymbopogon Citrates*). A dose efetiva por ingestão para o ^{226}Ra , variou de < 4 a $< 27 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ e para o ^{228}Ra variou de $1,38$ a $18,63 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$.

Para as concentrações de atividades específicas para o rádio 226 e rádio 228, respectivamente, enquanto as médias das atividades específicas encontradas neste trabalho resultaram em $11 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ e $8 \pm 2 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ para o rádio 226 e rádio 228, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Atividades específicas e dose efetiva de ^{226}Ra e ^{228}Ra para amostras de chá.

Amostra	Nome	$\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$			
		^{226}Ra		^{228}Ra	
A1	Capim Limão	< 4	< 1,12	ND	ND
A2	Espinheira Santa	ND	ND	ND	ND
A3	Pata de Vaca	ND	ND	ND	ND
A4	Camomila	<11	< 3,08	ND	ND
A5	Camomila Industrializada.	<9	< 2,52	ND	ND
A6	Alfavaca	ND	ND	ND	ND
A7	Guaco	<5	< 1,40	2 ± 1	1,38

A8	Chá Verde	< 4	< 1,12	3 ± 1	2,07
A9	Mate Ind.	<7	< 1,96	3 ± 1	2,07
A10	Chá Preto	ND	ND	3 ± 1	2,07
A11	Boldo	ND	ND	4 ± 1	2,76
A12	Mate	<12	< 3,36	4 ± 1	2,76
A13	Avenca	<17	< 4,76	3 ± 2	2,07
A14	Erva Doce	<8	< 2,24	5 ± 2	3,45
A15	Erva de São João	ND	ND	6 ± 2	4,14
A16	Hortelã	ND	ND	7 ± 2	4,83
A17	Tansagem	ND	ND	8 ± 2	5,52
A18	Panacéia	<15	< 4,20	9 ± 2	6,21
A19	Picão	ND	ND	9 ± 3	6,21
A20	Bardana	ND	ND	9 ± 3	6,21
A21	Quebra Pedra	<5	< 1,40	11 ± 2	7,59
A22	Artemisia	ND	ND	17 ± 3	11,73
A23	Melissa	<23	< 6,44	25 ± 4	17,25
A24	Erva Cidreira	<27	< 7,56	27 ± 3	18,63

Não detectado - ND

4.3 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA

Existem poucos dados na literatura sobre radioatividade natural nas diferentes amostras de chás analisadas neste estudo. Para comparar os resultados, das vinte e quatro amostras de chás analisadas, foram encontradas, na literatura para as concentrações de atividades específicas para o ^{40}K , as seguintes amostras de chás: Camomila, Bardana, Mate, Chá Preto e Chá Verde.

No trabalho conduzido por DESIDERE, MELI & ROSELLI (2010) com plantas medicinais na Itália, a atividade específica para ^{40}K nas folhas de Bardana foi 982 Bq.kg^{-1} , valor próximo ao encontrado no presente estudo que foi de $1087 \pm 40 \text{ Bq.kg}^{-1}$. No entanto, a atividade específica de chá de Camomila analisada neste estudo apresentou atividade específica de $603 \pm 23 \text{ Bq.kg}^{-1}$, valor inferior ao apresentado por DESIDERE, MELI & ROSELLI (2010): 1077 Bq.kg^{-1} .

Conforme SCHEIBEL & APPOLONI (2007), que analisou três marcas de chá Mate produzidas no sul do Brasil. No referido trabalho as diferentes marcas de chá foram citadas em forma de letras, tais como: A, B e C. A amostra C apresentou uma atividade específica

de $(666 \pm 13) \text{ Bq.kg}^{-1}$, valor próximo ao encontrado no presente estudo de $447 \pm 20 \text{ Bq.kg}^{-1}$. As amostras A e B tiveram uma atividade específica de $1216 \pm 8 \text{ Bq.kg}^{-1}$ e $1047 \pm 14 \text{ Bq.kg}^{-1}$, respectivamente, valores diferentes do que determinado no presente trabalho.

No trabalho conduzido por ISASA & MARQUINA (1980) com plantas medicinais em Madri, a atividade específica para ^{40}K nas folhas de chá preto foi de 461 Bq.kg^{-1} , valor próximo ao encontrado no presente estudo que foi de $464 \pm 20 \text{ Bq.kg}^{-1}$. No entanto, a atividade específica de chá Verde analisada neste estudo para o ^{40}K apresentou atividade específica de $421 \pm 17 \text{ Bq.kg}^{-1}$, valor maior ao apresentado por ISASA & MARQUINA (1980): 358 Bq.kg^{-1} .

A diferença na concentração de elementos é resultante das peculiaridades na absorção por diferentes estruturas botânicas das plantas como folha, raiz, casca, flores e a composição do solo em que foram cultivadas (THUNUS, 1994). Além disso, o uso de fertilizantes, proteções agrícolas e água de irrigação, assim como condições climáticas e poluição industrial podem contribuir para variações nas concentrações específicas normalmente observadas.

Os resultados obtidos mostram uma diferença considerável na atividade específica para o ^{40}K nos diferentes tipos de chás. Este fato não apresenta qualquer tipo de risco para o consumidor porque no corpo humano o potássio-40 comporta-se como um nutriente essencial devido à semelhança com o potássio estável, sendo uniformemente distribuído nos tecidos musculares e sua concentração mantém-se constante devido o equilíbrio homeostático (UNSCEAR, 2000).

Para o ^{40}K , a dose independe da quantidade de potássio ingerida, por este elemento estar sob controle homeostático no organismo. Com abundância natural de $1,17 \cdot 10^{-4} \%$ e atividade específica de $2,6 \cdot 10^8 \text{ Bq.kg}^{-1}$, as doses equivalentes anuais para tecidos a partir do ^{40}K são 165 e $185 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ para adultos e crianças, respectivamente. A dose efetiva total a partir da ingestão para o ^{40}K é de $170 \mu\text{Sv}$ (UNSCEAR, 2000).

Já os valores de dose efetiva para ingestão para adultos foram calculados com base nos fatores específicos de conversão de atividade para a dose efetiva anual tabelada na Publicação ICRP 72 (1996), cujos valores foram atualizados na Publicação ICRP 119 (2012) e os valores utilizados pela Posição Regulatória (PR 3.01/005) da norma (CNEN-NN-3.01), Diretrizes Básicas de Proteção Radiológicas, por esta seguir a mesma recomendação. Os valores variam de $1,1 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ (Capim Limão) para $6,7 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ (Bardana), valores inferiores à média anual no corpo humano que é de $0,17 \text{ mSv}$ para adultos e de $0,19 \text{ mSv}$ para crianças (UNSCEAR, 2000), e a maior contribuição no cálculo

da dose é devido à radiação beta e não à radiação gama emitida.

Os resultados obtidos para o cálculo de dose efetiva por ingestão para o ^{40}K são importantes para compreender os níveis de radioatividade e dosimetria associados à ingestão para os diferentes tipos de chás, para análise de efeitos biológicos, como o câncer, em doses baixas e a literatura também tem demonstrado o potencial papel dos chás, principalmente do chá verde na modulação de processos anti-inflamatórios, antitumorais, antiaterogênicos, hipoglicemiantes e no controle do peso, suas propriedade antioxidante do chá verde tem sido apontada como o principal fator contribuinte na prevenção e/ou no tratamento de diversas doenças crônico-degenerativas, incluindo o câncer, doenças cardiovasculares e diabetes.

Quanto ao ^{226}Ra e ^{228}Ra não se verificou nenhuma referência na literatura para as concentrações de atividades específicas para as vinte e quatro amostras de chás analisadas nesse trabalho. Esses resultados e avaliações referentes a este assunto visam suprir informações àqueles ainda não familiarizados ao tema, ao mesmo tempo em que possamos introduzir esclarecimentos a pesquisadores de áreas conexas, mas que não se dedicam ainda a esta linha de pesquisa.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo, foram analisadas vinte e quatro amostras de diferentes tipos de chás com a técnica de espectrometria gama seguida de cálculo de dose efetiva para ingestão usando os fatores de conversão recomendado pela Publicação ICRP 72 (1996), Cujos valores foram atualizados na Publicação ICRP 119 (2012). Os valores das atividades específicas para o ^{40}K variaram de $(184 \pm 56) \text{ Bq.kg}^{-1}$ (referente ao Capim Limão) para $(1087 \pm 40 \text{ Bq.kg}^{-1})$ (referente à Bardana) e a dose efetiva variou de $1,14 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ para $6,74 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$. Para o ^{226}Ra , os valores de atividade específica variaram de $< 4 \text{ Bq.kg}^{-1}$ a $< 27 \text{ Bq.kg}^{-1}$ e a dose efetiva variou de $< 4 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ a $< 27 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$. Para o ^{228}Ra , os valores de atividade específica variaram de $(2 \pm 1) \text{ Bq.kg}^{-1}$ a $(27 \pm 3) \text{ Bq.kg}^{-1}$ e a dose efetiva variou de $1,38 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ a $18,63 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$. De acordo com a (UNSCEAR, 2000), os valores de referência para as doses de radionuclídeos naturais são de $170 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$. Portanto, os valores encontrados nas diferentes amostras de chás analisadas foram inferiores aos de referência. Tais resultados demonstram que os valores de atividade específica e de dose efetiva quantificados no presente estudo não representam nenhum risco para a saúde humana.

Os resultados obtidos para as atividades específicas dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K nas amostras de chá mostram que a utilização do programa LabSOCS para o cálculo da curva de eficiência de detecção e as devidas correções é uma alternativa viável, devido à semelhança entre os valores encontrados no presente trabalho e na literatura. Este trabalho também traz uma relevante contribuição de dados para a literatura, para as atividades específicas dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K referente às diferentes amostras de chás. Na literatura, foram encontrados dados de atividade específica somente para o ^{40}K em três amostras de chá e seus valores foram similares ao presente trabalho. Portanto, o estudo desenvolvido poderá ser utilizado como parâmetro de referência para avaliar, em larga escala, por um método que conserva a integridade da amostra, a qualidade de diversos tipos de alimentos, além do chá, assegurando o consumo seguro dos mesmos. Tal constatação é de relevante importância para novos estudos e futuros experimentos o processo de infusão nas diferentes amostras de chás analisadas, uma vez que a literatura acerca destas relações é extremamente escassa.

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.

AWASOM, I., “Commodity of the Quarter Tea”. *Journal of Agricultural & Food Information*, vol. 12, issue 1, pp. 12–22, February 2011.

BADKE, M. R., Conhecimento popular sobre o uso de plantas medicinais e o cuidado de Enfermagem. 2008. Dissertação de M.Sc. Programa de Pós-graduação em Enfermagem, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

BÄRG FILHO, D., *Aquisição de Dados em Espectroscopia Gama Nuclear*. Dissertação de M.Sc., Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN, São Paulo, SP, 2000.

BIRAL, A. R. *Radiações ionizantes para médicos, físicos e leigos*. Florianópolis: Ed. Insular Ltda., 2002.

BOSTICK, B. C., **VAIRAVAMURTHY**, M. A., **CHOROVER**, J., “Cesium Adsorption on Clay Minerals: An EXAFS Spectroscopic Investigation”, *Environmental Science and Technology*, v. 36, pp. 2670-2676, May 2002.

BRADY, C. N. *Natureza e propriedade dos solos*. 7ª edição. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1989.

BRASIL – Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância Sanitária. *Regulamento Técnico de Espécies Vegetais para o preparo de Chás*. Resolução de Diretoria Colegiada. RDC n. 267, Setembro de 2005.

CANBERRA INDUSTRIES. *Genie TM 2000 3.3: Operations Manual*. USA, 2012.

- CARDOSO, L. X.**, *Análise de radionuclídeos naturais e artificiais do solo e de produtos alimentícios do estado de Sergipe, principalmente da região do platô de Neópolis (SE)*. Tese de D.Sc. Programa de Pós-graduação em Física, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2012.
- CROUTHAMEL, C. E., ADAMS, F., DAMS, R.**, *Applied gamma-ray spectrometry*, 2nd Edition, University of Michigan, 1970, Pergamon Press.
- DESIDERE D., MELI M. A., ROSELLI C.**, “Natural and artificial radioactivity determination of some medicinal plants”, *Italy Journal of Environmental Radioactivity*, v. 101, pp. 751-756, April, 2010.
- DOS SANTOS, R. N., MARQUES, L. S., RIBEIRO, F. B.**, “Estudo do equilíbrio radioativo das séries do U-238 e Th-232 em rochas vulcânicas das ilhas da Trindade e de Martim Vaz”, *Geochimica Brasiliensis*, v. 14, n. 1, pp. 135-153, 2000.
- DUARTE, M. R; MENARIM, D. O.** “Morfodiagnose da anatomia foliar e caulinar de *Camellia sinensis*(L.) Kuntze, Theaceae”. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v.16, n.4, pp.545-551, Out./Dez. 2006.
- EISENBUD, M.**, *Environmental radioactivity: from natural, industrial and military sources*, 3rd Edition. New York, U.S.A., Academic Press, 1987.
- EISENBUD, M., GESELL, T.**, *Environmental radioactivity: from natural, industrial and military sources*, 4th Edition. New York, U.S.A., Academic Press, 1997.
- FAO/UN** – Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Trade and markets – Commodity markets*. Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/est/est-commodities/tea/en/>>. Acesso em 29 Set 2017, 14:23 h.
- FILIP, R. et al.** “Antioxidant activity of *Ilex paraguariensis* and related species”. *Nutrition Research*, v.20, n.10, pp.1437-1446, October, 2000.

- ICRP** – International Commission on Radiological Protection, *ICRP Publication 30 – Limits for Intakes of Radionuclides by Workers (Part 2)*, v. 4, n. 3-4, Pergamon Press, 1978.
- ICRP** – International Commission on Radiological Protection, *ICRP Publication 56 – Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 1 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients*, v. 20, n. 2, Pergamon Press, 1990.
- ICRP** – International Commission on Radiological Protection, *ICRP Publication 72 – Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients*, v. 26, n. 1, Pergamon Press, 1995.
- ICRP** – International Commission on Radiological Protection, *ICRP Publication 119 – Compendium of dose Coefficients based on ICRP Publication 60*, v. 41, n. 1, Elsevier, 2012.
- ISASA, M. E. T., MARQUINA, A. D.**, “Minerals Elements in commercial teas – I) Macroelements.” *Anales de Bromatología*, XXXII-4, pp. 361-366, Madrid, 1980.
- KATHREN, R. L.**, “NORM sources and their origins”. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 49, n.3, pp. 149-168, March 1998.
- KETCHAM, R.A.**, “An improved method for determination of heat production with gamma-ray scintillation spectrometry”. *Chemical Geology*, v. 130, issues 3-4, pp. 175-194, August 1996.
- KNOLL, G. F.** *Radiation Detection and Measurement*, 4th Edition. New York, U.S.A., John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- LIMA, T. A.** “Chá e simpatia: Uma estratégia de gênero no Rio de Janeiro oitocentista”. *Anais do Museu Paulista*, v.5, pp.93-127, 1997.

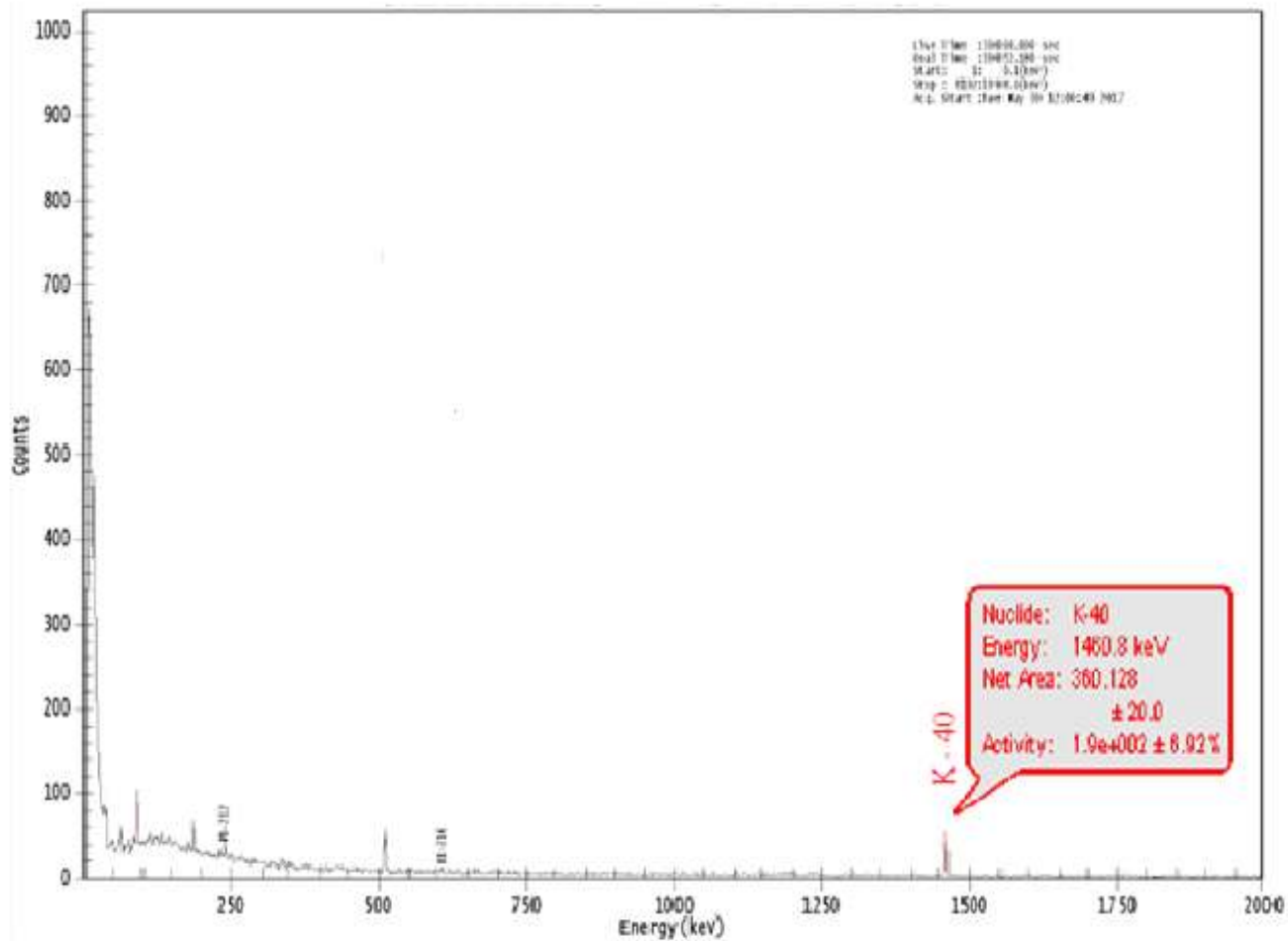
- LOPES, G. A. D. et al.**, *Plantas medicinais: indicação popular de uso no tratamento de hipertensão arterial sistêmica (HAS)*. Rev. Ciênc. Ext. v.6, n.2, p.143, 2010.
- LORENZI, H; MATOS, F. J. A.** “Plantas medicinais do Brasil: nativas e exóticas. Nova Odessa: Plantarum, 2002. 544p.
- MALANCA, A., PESSINA, V., DALLARA, G.**, “Assesment of the natural radioactivity in the Brazilian State of Rio Grande do Norte”, *Health Physics*, v. 65, issue 3, pp. 298-302, September, 1993
- MÍDIO, A. F; MARTINS, D. I.** *Toxicologia de alimento*. São Paulo: Livraria Varela, pp.163-252, 2000.
- NORM** – Naturally Occurring Radioactive Materials. World Nuclear Association. 2014. Disponível em: < <http://www.world-nuclear.org/info/Safetyand-Security/Radiation-and-Health/Naturally-Occurring-Radioactive-Materials-NORM/>>. Acesso em 22 de Set 2017, 12:18 h.
- PORTAL IBGE.** *Pesquisa de orçamentos familiares 2008 a 2009*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/saude/9050>>. Acesso em 29 Nov 2017, às 10:20 h.
- RAMLI, A. T., APRIANTORO, N. H., WAGIRAN, H.** “Assessment of Radiation Dose Rates in the High Terrestrial Gamma Radiation Area of Selama District, Perak, Malaysia”. *Applied Physics Research*, vol. 1, n.2, pp. 45-52, November, 2009.
- RAMOS, B. M. et al.** “Produção de capítulos florais da camomila em função de populações de plantas e da incorporação ao solo de cama-de-aviário”. *Hortic. Bras.*, v. 22, n. 3, July/September, 2004.
- SIMÕES, C. M. O. et al.**, *Farmacognosia: da planta ao medicamento*, 6ª revisão. Florianópolis, SC, Editora UFRS, 2010.

- SCHEIBEL, V.** *Determinação das doses efetivas por ingestão de farinhas de cereais através da espectrometria de raios gama*. Tese de D.Sc., Programa de Pós-graduação do Departamento de Física. Universidade Estadual de Londrina – UEL, Londrina, PR, Brasil, 2006.
- SCHEIBEL, V., APPOLONI, C. R.**, “Survey of Natural Radioactivity Levels in *Ilex paraguariensis* (St. Hil.) by Gamma-ray Spectrometry”. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 50, n. 5, pp. 901-904, September, 2007.
- SOUZA, M P. et al.** “Ação do estresse térmico na sobrevivência de mudas e produção de camomila originadas de sementes importadas e nacionais”. *Hortic. Bras.*, v. 24, n. 2, April/June, 2006.
- TAUHATA, L. et al.**, *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. 10ª revisão. Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD/CNEN/MCTI, Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- THUNUS L. et al.**, Hand book on Metals in Clinical and Analytical Chemistry, *Marcel Dekker*, New York, United Nations, 1994.
- TSUKAMOTO, R.Y.** *Teicultura no Brasil: Agricultura e indústria do chá no Brasil*. Tese de D.Sc., Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Londrina – UEL, Londrina, PR, 1994.
- UNSCEAR** – United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York, United Nations, 2000.
- VERNARELLI, J. A., LAMBERT, J. D.** “Tea consumption is inversely associated with weight status and other markers for metabolic syndrome in US adults”. *Europe an Journal of Nutrition*, v. 52, issue 3, pp. 1039-1048, April, 2013.
- WEISBURGER, J. H.** “Tea and health: a historical perspective”. *Cancer Letters*, v. 114, pp. 315-317, March 1997.
- WHO** – World Health Organization. *Monographs on Selected Medicinal Plants*. Vol. 1., Geneva, 1999. **WILLIAM, C.W.** Texas A&M University, College Station, Texas. *Camellias for Texas Gardens*. Disponível em:

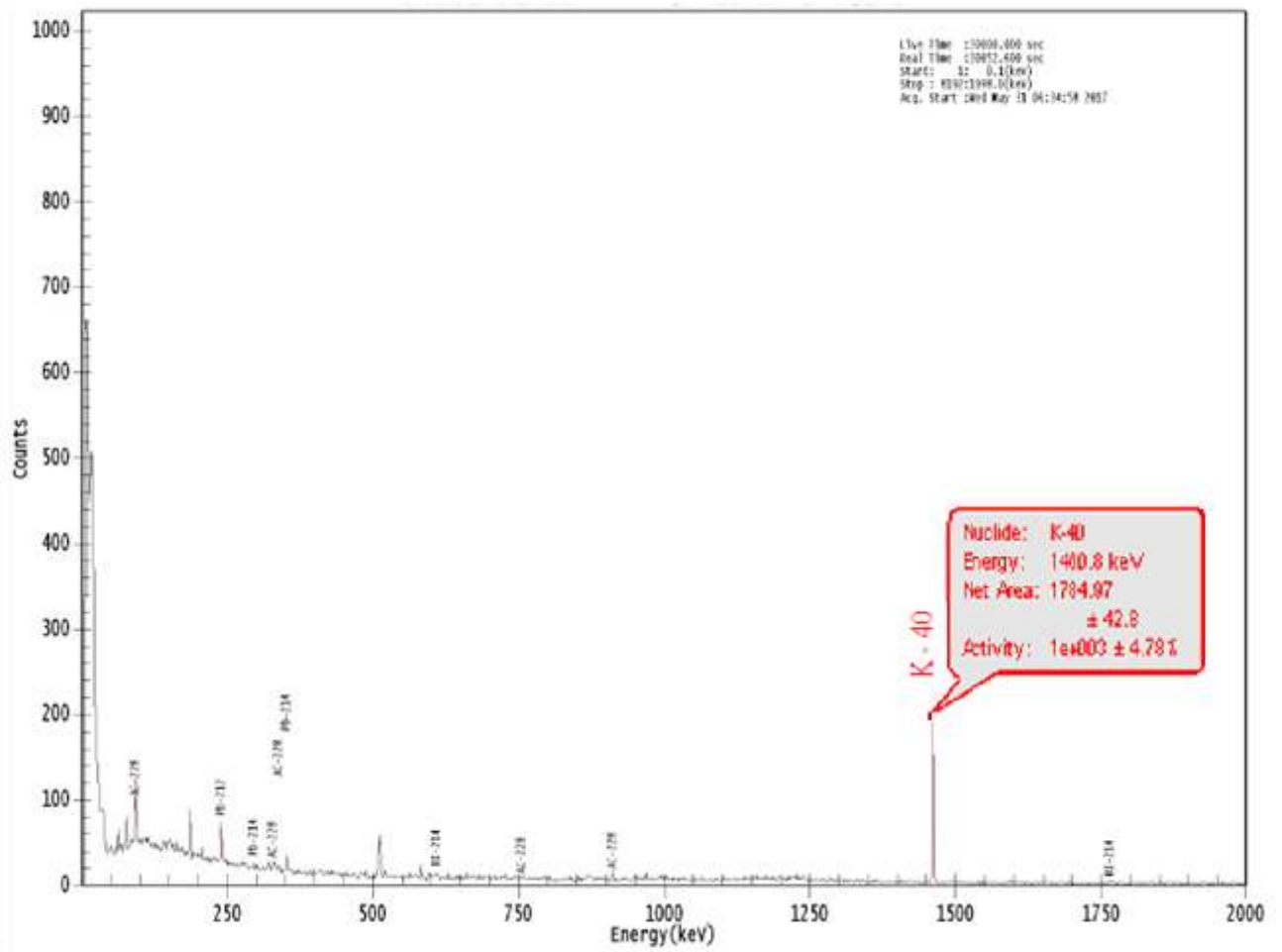
<<http://aggiehorticulture.tamu.edu/newsletters/hortupdate/2007/jan07/CamelliasTxGard.html>>. Acesso em 29 de Nov 2017, 17:47 h.

ANEXO I. ALGUNS ESPECTROS OBTIDOS NO PRESENTE ESTUDO

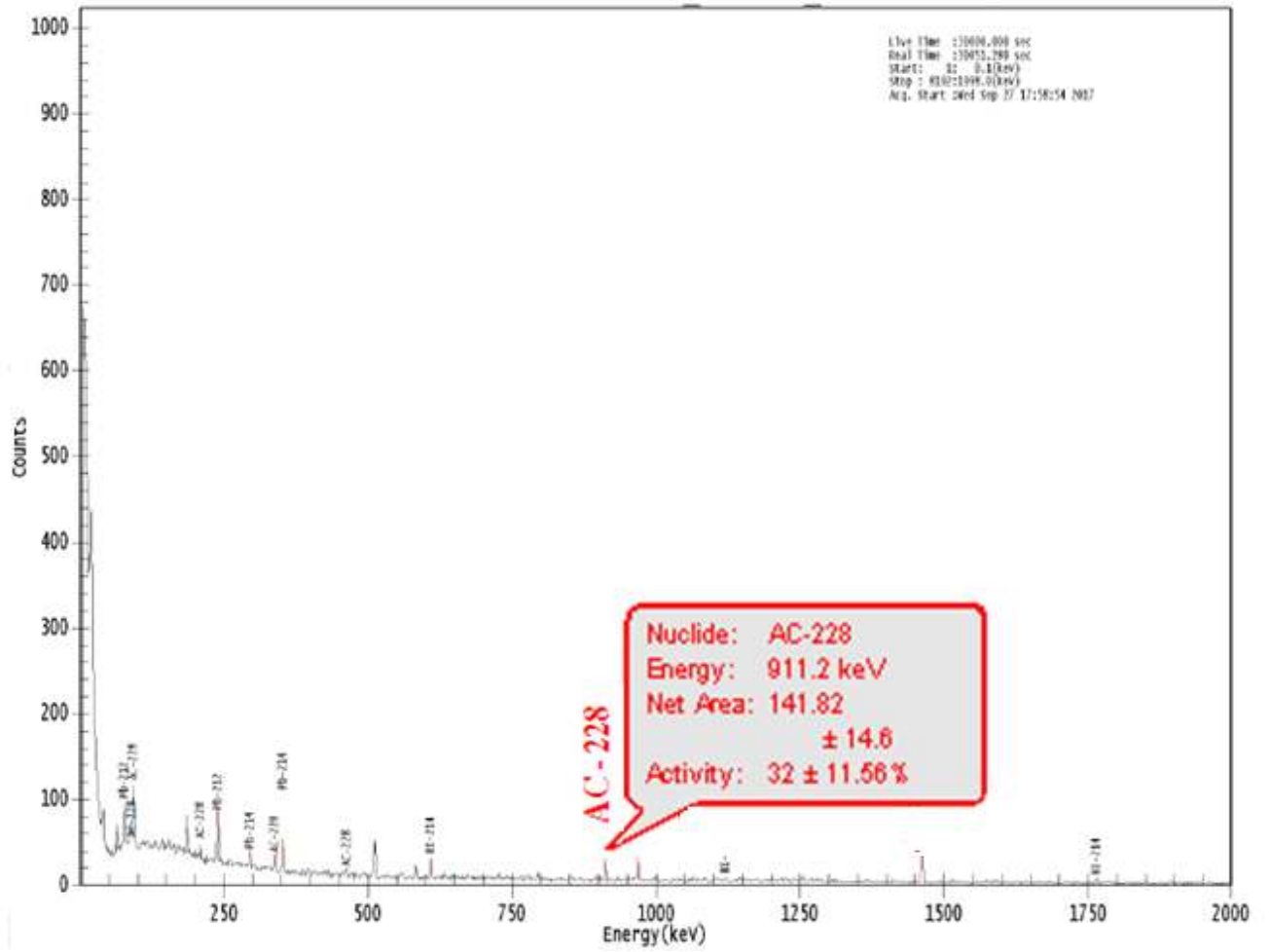
Espectro de Capim Limão para o ^{40}K .



Espectro de Bardana para o ^{40}K .



Espectro de Erva Cidreira para o ^{228}Ra .



Espectro de Guaco para o ^{228}Ra .

