



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE NUTRIÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM NUTRIÇÃO

YASMIN MARQUES DOS SANTOS

**MODELO EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DE TRAÇOS DE CÉSIO
EM AÇÚCAR - REQUISITO DE SEGURANÇA ALIMENTAR**

Recife
2024

YASMIN MARQUES DOS SANTOS

**MODELO EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DE TRAÇOS DE CÉSIO
EM AÇÚCAR - REQUISITO DE SEGURANÇA ALIMENTAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Nutrição da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Nutrição.

Orientadora: Profa. Dra. Leopoldina Augusta Souza Sequeira de Andrade.

Coorientadora: Profa. Dra. Isvânia Maria Serafim da Silva Lopes.

Recife

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Yasmin Marques dos.

Modelo experimental para caracterização de traços de cézio em açúcar -
Requisito de segurança alimentar / Yasmin Marques dos Santos. - Recife, 2024.
39 p. : il., tab.

Orientador(a): Leopoldina Augusta Souza Sequeira de Andrade

Coorientador(a): Isvânia Maria Serafim da Silva Lopes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Ciências da Saúde, Nutrição - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Açúcar. 2. Alimento. 3. Radioatividade. 4. Segurança alimentar. I.
Andrade, Leopoldina Augusta Souza Sequeira de. (Orientação). II. Lopes, Isvânia
Maria Serafim da Silva. (Coorientação). IV. Título.

610 CDD (22.ed.)

YASMIN MARQUES DOS SANTOS

**MODELO EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DE TRAÇOS DE CÉSIO
EM AÇÚCAR - REQUISITO DE SEGURANÇA ALIMENTAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Nutrição da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Nutrição.

Aprovado em: 17/10/2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Leopoldina Augusta Souza Sequeira de Andrade (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Giselia de Santana Muniz (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Margarida Angélica da Silva Vasconcelos (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais e amigos,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Josineide Marques e José Araújo, cujo suporte, incentivo e confiança foram a base sobre a qual construí a minha trajetória acadêmica e pessoal.

Agradeço às minhas amigas de graduação e de vida, Beatriz Campos e Camilla Tenorio, pelos momentos compartilhados, aprendizados e forte laço que construímos.

À Profa. Dra. Leopoldina Augusta Souza Sequeira de Andrade (Departamento de Nutrição) e à Profa. Dra. Isvânia Maria Serafim da Silva Lopes (Departamento de Biofísica e Radiobiologia), agradeço pelas orientações e ensinamentos ao longo do curso e do desenvolvimento da pesquisa.

As(os) brasileiras(os) e ao Governo Federal, por terem, por intermédio da Universidade Federal de Pernambuco, financiado meus estudos.

As(os) professoras(es) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), especialmente aquelas(es) lotadas(os) no Departamento de Nutrição, pelas oportunidades e conhecimentos repassados.

Ao Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) - Escola de Engenharia de Pernambuco (EEP) e ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) da UFPE pela infraestrutura física, laboratorial, equipamentos e insumos disponibilizados.

Aos membros do Grupo de Radioecologia (RAE) do DEN pelas contribuições, suporte e ensinamentos.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo financiamento das bolsas de Iniciação Científica BIC-0095-4.06/22 e BIC-0074-4.06/23.

RESUMO

A garantia da Segurança Alimentar e Nutricional requer medidas de prevenção, detecção e controle de riscos durante a cadeia produtiva de alimentos. Dentre esses riscos, destacam-se os radionuclídeos antrópicos, como o ^{137}Cs , que, quando no meio ambiente, podem ser incorporados pelos seres vivos através da alimentação. Essa exposição, a depender da dose, pode levar a maior probabilidade de efeitos determinísticos e/ou estocásticos. A monitoração radioativa do célio em amostras de açúcar, a depender do local de destino, passa a ser um requisito obrigatório para exportação do produto, pois permite rastrear possíveis contaminações nos diferentes compartimentos ambientais e na população. Isso posto, objetivou-se desenvolver um modelo de calibração eficiente e de baixo custo para o espectrômetro gama do tipo HPGe-Be para análise de açúcar destinado a exportação. O projeto foi desenvolvido no Departamento de Energia Nuclear do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco. Para delineamento do recipiente dedicado, foi utilizado o *software* Cura Ultimaker. Seguiu-se para a impressão 3D, fazendo uso de impressora GTMax3D, modelo A2V2. Na preparação dos padrões secundários, foram utilizadas amostras de solo de baixo *background* radioativo com granulometria e densidade próximas ao açúcar do tipo VHP. Fonte radioativa aberta do isótopo de célio foi previamente diluída, com posterior deposição de concentrações diferentes em duas amostras de solo com 300 g cada. A certificação do experimento foi realizada pelas medidas dos padrões secundários e avaliação das respostas obtidas pelo sistema de detecção. Quando considerada a relação entre as atividades de referência e empírica, observou-se um erro relativo médio de apenas 2,6%. Considerando a energia teórica e o valor médio obtido empiricamente, observou-se um erro relativo inferior a 0,01%. Outrossim, a resolução encontrada foi de 0,64%, um valor considerado excelente. Além disso, em comparação aos *marinellis* convencionais, o custo do recipiente produzido foi aproximadamente 218 vezes menor. Desenvolveu-se, portanto, um modelo de calibração eficiente e econômico para análise de ^{137}Cs em açúcar destinado a exportação.

Palavras-chave: açúcar; alimento; radioatividade; segurança alimentar.

ABSTRACT

Ensuring Food and Nutritional Security requires risk prevention, detection, and control measures throughout the food production chain. Among these risks, anthropogenic radionuclides, such as ^{137}Cs , stand out, which, when in the environment, can be incorporated by living beings through food. This exposure, depending on the dose, can lead to a greater probability of deterministic and/or stochastic effects. Depending on the destination, radioactive monitoring of cesium in sugar samples becomes a mandatory requirement for exporting the product, as it allows tracking possible contamination in different environmental compartments and in the population. Therefore, the objective was to develop an efficient and low-cost calibration model for the HPGe-Be gamma spectrometer for analyzing sugar destined for export. The project was developed at the Department of Nuclear Energy of the Center for Technology and Geosciences of the Federal University of Pernambuco. The Cura Ultimaker software was used to design the dedicated container. The 3D printing process was followed by a GTMax3D printer, model A2V2. In the preparation of the secondary standards, soil samples with low radioactive background and particle size and density close to VHP sugar were used. An open radioactive source of the cesium isotope was previously diluted, with subsequent deposition of different concentrations in two soil samples weighing 300 g each. The experiment was certified by measuring the secondary standards and evaluating the responses obtained by the detection system. When considering the relationship between the reference and empirical activities, an average relative error of only 2.6% was observed. Considering the theoretical energy and the average value obtained empirically, a relative error of less than 0.01% was observed. Furthermore, the resolution found was 0.64%, a value considered excellent. In addition, compared to conventional marinellis, the cost of the container produced was approximately 218 times lower. Therefore, an efficient and economical calibration model was developed for the analysis of ^{137}Cs in sugar destined for export.

Keywords: sugar; food; radioactivity; food security.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
Figura 1 - Espectro eletromagnético	13
Figura 2 - Efeitos da exposição à radiação ionizante	14
Figura 3 - Sistema de espectrometria gama de alta resolução	22
Figura 4 - Esquema de decaimento do ^{137}Cs	23
Figura 5 - Modelo do recipiente dedicado ao HPGe-Be	24
Figura 6 - Recipientes dedicados, produzidos em impressora 3D	25
Figura 7 - Recipiente convencional.....	25
Figura 8 - Sistema de medidas com recipiente dedicado em posição de análise	26
Figura 9 - Calibração em energia do sistema HPGe-Be.....	27
Figura 10 - Padrões secundários de ^{137}Cs	28
Figura 11 - Relação entre as atividades de referência e empírica	29
Figura 12 - Correlação entre as transições gama experimentais e teóricas.....	30
Figura 13 - Resolução em energia para o sistema de medidas	31
Figura 14 - Espectros gama para o padrão com 10 mL ^{137}Cs	32
Figura 15 - Espectros gama para o padrão com 15 mL ^{137}Cs	33

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 SEGURANÇA ALIMENTAR	12
2.2 RADIOATIVIDADE E IMPACTOS NA SAÚDE PÚBLICA	13
2.3 AÇÚCARES.....	15
2.4 SISTEMAS DE MONITORAÇÃO RADIOATIVA	15
2.5 GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS	16
3 OBJETIVOS	19
3.1 OBJETIVO GERAL.....	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4 METODOLOGIA	20
4.1 CAPACITAÇÃO	20
4.2 MATRIZ DO ESTUDO E MODELO VARIANTE	20
4.3 SISTEMA DE MEDIDAS NUCLEARES E ARRANJO EXPERIMENTAL	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1 IDEALIZAÇÃO E PROJETO DO RECIPIENTE DEDICADO	24
5.2 ARRANJO EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO	26
5.3 CALIBRAÇÃO EM ENERGIA.....	27
5.4 PREPARAÇÃO DOS PADRÕES SECUNDÁRIOS.....	28
5.5 CERTIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO	29
6 CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1 INTRODUÇÃO

De início, é lícito postular que, de acordo com a Lei Nº 11.346/2006, pode-se definir Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) como o acesso a alimentação saudável e segura, em quantidades suficientes para atender às necessidades e promover saúde à população. Nesse contexto, estão inclusas medidas de prevenção, detecção e controle de riscos durante toda a cadeia produtiva (Brasil, 2006).

No que diz respeito aos riscos em alimentos, merecem destaque os radionuclídeos antrópicos, ou também chamados de artificiais, cuja presença no meio ambiente resulta da ação humana, como testes e acidentes nucleares, atividades não autorizadas e outras práticas (UNSCEAR, 2000). Outrossim, esses elementos podem se dissipar pelas diferentes vias de transferência, como ar, solo e água, sendo eventualmente incorporados pelos seres vivos através da alimentação, o que pode levar a exposições adicionais e, conseqüentemente, a maior probabilidade de efeitos determinísticos (Gavrilescu; Pavel; Cretescu, 2009), uma vez que a contaminação dos organismos vivos é caracterizada pela ingestão, inalação ou absorção (Okuno, 2013).

Para garantia da segurança nuclear e suas aplicações, é necessário o monitoramento contínuo e o controle da radioatividade não suportada, onde as metodologias radioanalíticas devem possibilitar rapidez nas avaliações, alta resolução, eficiência e sensibilidade (IAEA, 2003; Santos Júnior *et al.*, 2006; Crouthamel; Adams; Dams, 2013). Assim, no Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é responsável pela fiscalização e normatização das aplicações nucleares, estabelecendo como restrição a comercialização de alimentos com atividades específicas que superem 1,0 kBq/kg para o ^{137}Cs (CNEN, 2024).

Ademais, no que tange a exportação de produtos alimentícios, vale ressaltar que a análise e emissão de laudo radiométrico pode ser requisito essencial para efetivação do processo. Dentre esses alimentos, destaca-se o açúcar, um carboidrato derivado, principalmente, da cana-de-açúcar e da beterraba, com produção mundial, na safra 2022/2023, superior a 170 milhões de toneladas (Vidal, 2023; NIH, 2024). O teor de sacarose, a umidade, a coloração, os sólidos solúveis, a granulometria e o teor de cinzas são utilizados para diferenciar seus tipos, sendo os mais comercializados o refinado, o cristal e o VHP (do inglês: *Very High Polarization*) (Brasil, 1978; Macedo; Marjotta-Maistro, 2015; Mandro, 2016).

Em adição ao supracitado, a cana-de-açúcar, um dos principais cultivos agrícolas a nível global, tem sua maior parcela de produção concentrada no Brasil, sendo considerada, portanto, a matéria prima de maior utilização para produção de açúcar no país (Lopes, 2017). Além disso, o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de açúcar, sendo responsável, na safra 2022/2023, por 22% da produção e por 44% do comércio global (Vidal, 2023).

Diante do exposto, a monitoração radioativa do ^{137}Cs em amostras de açúcar passa a ser um requisito obrigatório para exportação do produto, pois permite rastrear a presença do radionuclídeo na crosta terrestre e possível contaminação nos diferentes compartimentos do meio ambiente e população (CNEN, 2011). Essa prática, que é utilizada por órgãos internacionais para o controle das atividades nucleares no planeta, a exemplo da Agência Internacional de Energia Nuclear (por sigla do inglês: IAEA), permite a caracterização e quantificação do cézio e obrigatoriedade de investigar outros radionuclídeos antrópicos, que devem ser conduzidas por metodologias rápidas e eficientes, destacando-se a espectrometria gama de alta resolução, método de análise não destrutivo (Eisenbud; Gesell, 1997).

Giannakopoulou e colaboradores também destacam a importância em rastrear isótopos do cézio em alimentos, pois esse elemento é considerado um dos principais produtos de fissão nuclear, tendo similaridade química com o potássio, alta mobilidade em solos, alta solubilidade, longa meia vida física, de aproximadamente 30 anos, e fácil assimilação pelos animais e vegetais (Giannakopoulou *et al.*, 2007).

Destarte, visando um método rápido, eficiente, de alta resolução e baixo custo, o presente estudo objetivou desenvolver um modelo de calibração para o espectrômetro gama do tipo HPGe-Be para análise de ^{137}Cs em amostras de açúcar destinado à exportação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SEGURANÇA ALIMENTAR

Os alimentos estão diretamente relacionados ao homem, visto que representam uma fonte essencial para a sua subsistência, sendo importante a presença de nutrientes em quantidade e qualidade suficientes para garantir uma nutrição adequada (Santos, 2002).

A maior parte dos alimentos consumidos pelo homem é proveniente de solos, sendo este a principal fonte de suprimento de nutrientes para as plantas. Os alimentos, em particular os de origem vegetal, apresentam teores variáveis de elementos químicos essenciais e não essenciais, o que depende, por exemplo, das características físico-químicas e mineralógicas do solo e das práticas agrícolas. Dentre os elementos não essenciais, estão os metais pesados e os radionuclídeos (Santos, 2002; Lopes, 2018). A concentração de atividade desses elementos numa determinada área é geralmente estável e baixa, embora possa variar em consequência da atividade humana (Godyń *et al.*, 2014).

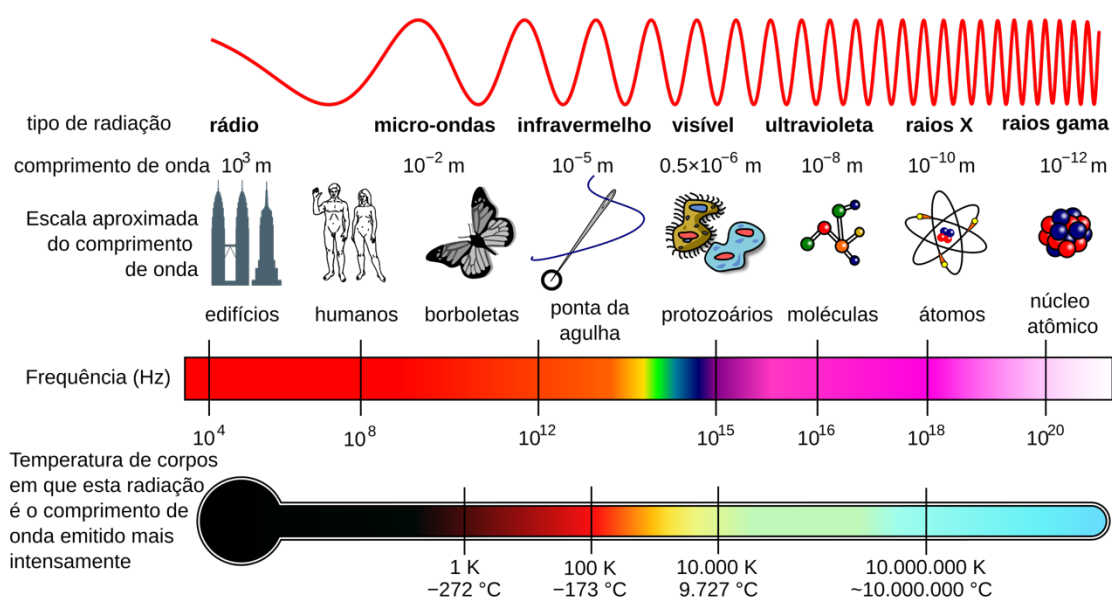
O conhecimento da concentração de radionuclídeos em alimentos pode contribuir para o entendimento e prognóstico dos problemas de saúde advindos do meio ambiente. Alguns metais presentes nas rochas e solos são considerados macro ou micronutrientes essenciais, possuindo uma variedade de funções bioquímicas em todos os organismos vivos. Embora essenciais, podem ser tóxicos quando ingeridos em excesso, sendo a toxicidade inerente a cada elemento. O homem, como consumidor, encontra-se no final de muitas cadeias alimentares e, devido à bioacumulação, está, por vezes, exposto a esses agentes tóxicos e/ou radioativos em função do seu hábito alimentar (Santos, 2002).

Diante do exposto, vale destacar que, no Brasil, há uma escassez estudos sobre radioatividade ambiental. Outrossim, as publicações existentes, em geral, apresentam ensaios para uma variedade de alimentos com características semelhantes ou espécies parecidas (Lopes, 2018). Desse modo, informações sobre a avaliação da exposição à radiação em alimentos vem despertando interesse, principalmente em decorrência das modificações antrópicas e seu potencial efeito biológico no indivíduo, mesmo quando em baixas concentrações (UNSCEAR, 1993).

2.2 RADIOATIVIDADE E IMPACTOS NA SAÚDE PÚBLICA

A radiação é uma forma de energia que se propaga em ondas eletromagnéticas e/ou partículas, podendo ser classificada em não ionizante e ionizante. A radiação não ionizante é aquela que possui energia relativamente baixa, sendo capaz de excitar átomos e moléculas, mas não de causar ionização, ou seja, de remover elétrons dos átomos. São exemplos: ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível e ultravioleta. Por outro lado, a radiação ionizante é aquela que possui energia suficiente para ionizar átomos e moléculas, sendo exemplos as partículas alfa e beta, raios-X e raios gama (Figura 1) (Cardoso, 2012; Silva; Padilha, 2019).

Figura 1 - Espectro eletromagnético



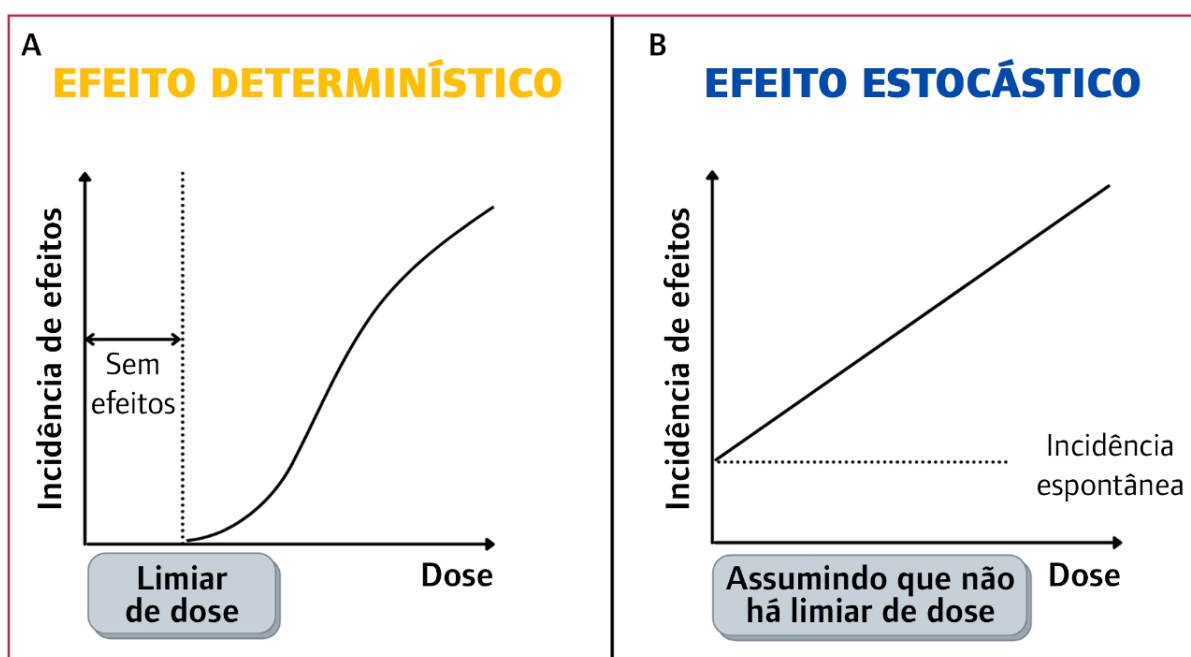
Fonte: Wikipédia (2015).

Os radionuclídeos, fontes de radiação ionizante, por sua vez, são classificados em naturais e antrópicos, ou também chamados de artificiais. Dentre os antrópicos, o ^{137}Cs é o mais abundante, sendo proveniente do *fallout* (precipitação) de testes nucleares lançados na atmosfera na década de 60. Os acidentes nucleares ocorridos ao longo do tempo também contribuíram para o depósito desse elemento na superfície terrestre (Guimarães, 1988; Szabó *et al.*, 2012). Além disso, o ^{137}Cs possui características que aumentam a sua importância como contribuinte para doses de

radiação, como meia-vida física longa, de 30 anos, similaridade ao potássio e emissão de partículas beta, elétrons de alta energia (Ashraf *et al.*, 2014).

Em adição ao supracitado, vale destacar que, uma vez presentes no meio ambiente, os radioisótopos podem se dissipar através das diferentes vias de transferência, como solo, ar e água, sendo eventualmente incorporados pelos seres vivos através da alimentação (Gavrilescu; Pavel; Cretescu, 2009). Essa exposição, segundo Oliveira *et al.* (2022), a depender da dose, pode levar aos efeitos determinísticos, como catarata e doenças vasculares, cardíacas e cerebrais. Outrossim, há ainda a probabilidade de efeitos estocásticos, que são tardios e ocorrem de maneira probabilística. Estes incluem o desenvolvimento de células tumorais, o envelhecimento precoce e a redução da longevidade, bem como mutações gênicas e alterações cromossômicas (Figura 2) (Oliveira *et al.*, 2022).

Figura 2 - Efeitos da exposição à radiação ionizante



Fonte: Oliveira *et al.* (2022).

Diante do exposto, entende-se que a monitoração e medida de radionuclídeos no meio ambiente e nos alimentos é de grande importância para a garantia da segurança alimentar e para o controle dos níveis de radiação a que os seres vivos estão expostos direta ou indiretamente (Lopes, 2018).

2.3 AÇÚCARES

A sacarose, popularmente conhecida como açúcar de mesa, é um dissacarídeo formado pela combinação de uma molécula de glicose e uma de frutose, sendo a sua fórmula molecular $C_{12}H_{22}O_{11}$. Este carboidrato, amplamente consumido no Brasil e no mundo, é utilizado como adoçante em produtos como refrigerantes, sucos, chocolates, confeitados, conservas e geleias (Scapin; Fernandes; Proença, 2017; Carvalho, 2019; Correia, 2019).

No Brasil, a principal forma de produção de açúcares é através da cana-de-açúcar. São as principais etapas desse processo: (1) limpeza da matéria prima; (2) moagem para extração do caldo da cana; (3) evaporação do caldo para originar o xarope concentrado; (4) cristalização, centrifugação e secagem do xarope. Outrossim, vale destacar que, a depender do tipo de açúcar a ser produzido, outros processos intermediários podem fazer parte da produção (Machado, 2012; Correia, 2019).

Atualmente, os tipos de açúcares produzidos e consumidos em todo o mundo são o mascavo, demerara, cristal, refinado, líquido e VHP (do inglês: *Very High Polarization*). Essas classes diferem de acordo com o teor de sacarose, a coloração, a umidade, os sólidos solúveis a granulometria e o teor de cinzas (Macedo; Marjotta-Maistro, 2015; Mandro, 2016; Correia, 2019).

Por fim, de acordo com Vidal (2023), a produção anual de açúcar em 2022/2023 ultrapassou 170 milhões de toneladas. Nessa mesma safra, o Brasil, tradicionalmente o maior produtor global desse alimento, foi responsável por 22% da produção e por 44% do comércio global. Ademais, para a safra 2023/2024, as projeções indicam que o país responderá por 22,3% da oferta global e por 48,2% das exportações, o que representa, em comparação com a safra anterior, um aumento de 15% (USDA, 2023; Vidal, 2023).

2.4 SISTEMAS DE MONITORAÇÃO RADIOATIVA

São muitas as técnicas utilizadas para medir concentrações de radionuclídeos em diferentes matrizes, as quais diferem nos limites de detecção, na seletividade, na reprodutibilidade e no tempo e custo de análise (Ribas, 2018). Dentre estas, pode-se destacar a espectrometria gama, um método de análise não destrutivo, capaz de fornecer dados quantitativos e qualitativos de radionuclídeos emissores gama, obtidas

mediante aquisição e análise de seus espectros de emissão. Quanto a isso, é importante destacar que cada fóton de raio gama tem uma energia discreta, que, por sua vez, é característica para cada radioisótopo, possibilitando, assim, a sua identificação (IAEA, 2003; Fragoso *et al.*, 2014; Garcêz, 2016).

No que diz respeito aos detectores mais utilizados na espectrometria gama, estes são: (1) detectores de cintilação, como o iodeto de sódio ativado com tálio NaI(Tl); e (2) detectores semicondutores, como o de germânio hiperpuro (por sigla do inglês: HPGe - *High Purity Germanium*), devido às suas vantagens operacionais, como a capacidade de fornecer uma grande quantidade de informações em uma única análise (Santos Júnior, 2009).

Os semicondutores funcionam a partir do princípio da excitação de elétrons, que passam das bandas de valência para a banda de condução, dando origem ao processo de detecção (Knoll, 2010; Lopes, 2018). Ou seja, quando a radiação gama oriunda de uma amostra é absorvida por cristais semicondutores, um par elétron-lacuna é formado. Estes pares são transportados sob um campo elétrico externo para os eletrodos, onde um pulso é gerado com amplitudes que são diretamente dependentes do tipo de interação (efeito fotoelétrico, espalhamento Compton ou produção de pares) e a energia do fóton incidente. Tais cargas elétricas são amplificadas, digitalizadas e interpretadas através de *softwares* (L'annunziata, 2003; Arine, 2017).

Ademais, a eletrônica associada ao semicondutor inclui um sistema de aquisição de dados com um detector para medida de radiação gama, fonte de alimentação e um multicanal, controlados por um microcomputador padrão. Convém observar que detectores HPGe operam com resfriamento a nitrogênio líquido, a uma temperatura de -196°C , para bandear a condutividade deste semicondutor (Garcêz, 2016).

2.5 GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS

A instrumentação nuclear requer o conhecimento de conceitos de grandezas e unidades específicas, que são aplicadas com propósito de interpretação e comparação de medidas. No presente estudo, assim como em outras pesquisas na área, algumas dessas grandezas foram aplicadas para o arranjo experimental, tratamento e obtenção dos resultados, dentre as quais pode-se citar: (1) velocidade

de desintegração radioativa (atividade); (2) atividade específica; (3) lei do decaimento radioativo; (4) meia-vida física; e (5) limite de quantificação.

A atividade (A) de uma fonte radioativa representa o número de transformações nucleares de energia por unidade de tempo. No Sistema Internacional de Unidades, é expressa em becquerel, cujo símbolo é Bq. Vale destacar que a unidade mais antiga para esta grandeza é o Curie, representada por Ci, que corresponde à $3,7\text{E}10$ Bq (UNEP, 2006).

A atividade específica é a razão entre a atividade e a massa ou volume da amostra que contém o material radioativo. Em termos matemáticos, a velocidade de desintegração de uma amostra radioativa pode ser calculada pela Equação 1, onde o número de desintegrações nucleares, dN , por unidade de tempo, dt , é proporcional à quantidade de material radioativo na amostra, N , (massa ou número de átomos), para um radionuclídeo, cuja constante de decaimento radioativo é dada por λ (Mazzilli; Máduar; Campos, 2011). O valor negativo na expressão abaixo representa a condição de decaimento radioativo.

$$A = dN/dt = -\lambda N \quad (1)$$

A lei do decaimento radioativo, Equação 2, é aplicada para correção da atividade de uma fonte radioativa com o passar do tempo. Na Equação 2, N representa o número ou quantidade de átomos radioativos presentes em uma amostra num instante t ; N_0 é o número de átomos radioativos num instante inicial, ou seja, quando $t_0 = 0$; e define a função exponencial; λ é a constante de decaimento radioativo e t o tempo transcorrido entre o início e o fim da observação ou medida (Mazzilli; Máduar; Campos, 2011).

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

Com base na Equação 2, é possível, por dedução matemática, chegar à Equação 3, que representa a meia-vida física de uma fonte radioativa, $t_{1/2}$, que por definição, é o tempo necessário para que uma amostra radioativa tenha sua atividade reduzida à 50% do valor inicialmente monitorado e medido, sendo representada pela razão entre o logaritmo natural de 2, $\ln 2$, e a constante de decaimento radioativo, λ , onde o $\ln 2$ é 0,693 (Mazzilli; Máduar; Campos, 2011).

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \quad (3)$$

Pelo princípio das aplicações nucleares e Equações 1, 2 e 3 foram definidos os modelos matemáticos para obtenção dos resultados propostos no referente estudo, fazendo uso do arranjo experimental estabelecido na metodologia e calibração do sistema de medidas.

Ao final dos experimentos, foi considerada a Equação 4, utilizada para calcular o Limite de Quantificação (LQ), que representa o menor valor na contagem das transições gama de um radionuclídeo que pode ser obtida com exatidão (Currie, 1968; Correia, 2019).

$$LQ = \left\{ 1 + \left[1 + \frac{N_{Ei}}{12,5} \right]^{1/2} \right\} \quad (4)$$

Na Equação 4, N_{Ei} , foi considerado como sendo o valor da incerteza da contagem líquida total associada ao fotopico de interesse.

Alguns parâmetros podem interferir no resultado do LQ , como o tipo de matriz em investigação, a geometria de medida, o tempo que foi padronizado para as análises, o tipo de detector, a probabilidade da emissão, a energia emitida e a radiação de fundo do laboratório (Correia, 2019).

Importante destacar que outras equações são consideradas em espectrometria gama, onde ocorre necessidade de uso de modelos semiempíricos para inferir condições de operação do sistema de medidas, assim como qualificar e quantificar o isótopo radioativo. Essas equações serão tratadas no capítulo sobre a metodologia, considerando serem de aplicação direta ao modelo utilizado na pesquisa.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do estudo foi desenvolver um modelo de calibração eficiente e de baixo custo para o espectrômetro gama do tipo HPGe-Be para análise de ^{137}Cs em açúcar destinado a exportação.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dos objetivos específicos, destacam-se:

- a) Confeccionar um recipiente com geometria apropriada para revestir o detector de medidas;
- b) Construir um modelo de calibração;
- c) Aplicar o modelo de calibração para análises de césio em açúcar;
- d) Realizar o tratamento dos dados com ensaios estatísticos.

4 METODOLOGIA

A metodologia envolveu um planejamento abrangente, com enfoque nos seguintes aspectos: (1) definição da geometria do recipiente dedicado; (2) impressão em 3D; (3) preparação de padrões radioativos secundários; (4) calibração do sistema de medidas; (5) levantamento de modelos empíricos; e (6) testes da metodologia variante para análise de açúcar.

4.1 CAPACITAÇÃO

Primeiramente, com auxílio de profissionais do Grupo de Radioecologia (RAE), foram realizados treinamentos nos laboratórios LARCA e LABRAN, visando entendimento sobre os métodos aplicados, normas de segurança e uso da infraestrutura e de equipamentos. Outrossim, foram obtidos conhecimentos sobre Proteção Radiológica, manipulação de fontes radioativas abertas, preparação de padrões radioativos secundários e outras ferramentas de suporte. Vale destacar que o treinamento com fontes radioativas ocorreu de forma totalmente teórica, sendo a manipulação realizada apenas por profissionais devidamente capacitados e autorizados.

Também ocorreu aprendizagem sobre o *software* Cura Ultimaker, versão gratuita, utilizado na modelagem do recipiente dedicado, que foi a base para o desenvolvimento do método variante de investigação de ^{137}Cs em amostras de açúcar. Além disso, leituras de artigos científicos, trabalhos publicados e desenvolvidos pelo referido Grupo de Pesquisa também foram objetos de dedicação durante o desenvolvimento do projeto.

4.2 MATRIZ DO ESTUDO E MODELO VARIANTE

Primeiramente, vale ressaltar que o presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Radioecologia e Controle Ambiental (LARCA) e no Laboratório de Radioquímica e Análise Nuclear (LABRAN), ambos pertencente ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) - Escola de Engenharia de Pernambuco (EEP) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

No preparo dos padrões secundários, volumes de 10 e 15 mL de ^{137}Cs , previamente diluídos em solução de ácido clorídrico, foram incorporados a 300 g de solo de baixo *background* radioativo com granulometria semelhante ao açúcar VHP. Posteriormente, as amostras foram levadas à estufa em uma temperatura de 60 °C, onde permaneceram até a secagem. Quanto à manipulação desse material, é importante ressaltar que foi realizada por profissionais capacitados e com autorização para trabalhar com fontes radioativas abertas.

Um modelo de segurança que permitiu a homogeneização dos padrões foi desenvolvido no estudo, sendo aplicado no laboratório LARCA, onde ocorreu os ensaios radiométricos, radioquímicos e químicos. Paralelamente, foi construído um modelo computacional de recipiente dedicado ao sistema de medidas capaz de revestir todo volume ativo do detector HPGe-Be, o qual foi desenhado com auxílio do *software* Cura Ultimaker, versão gratuita.

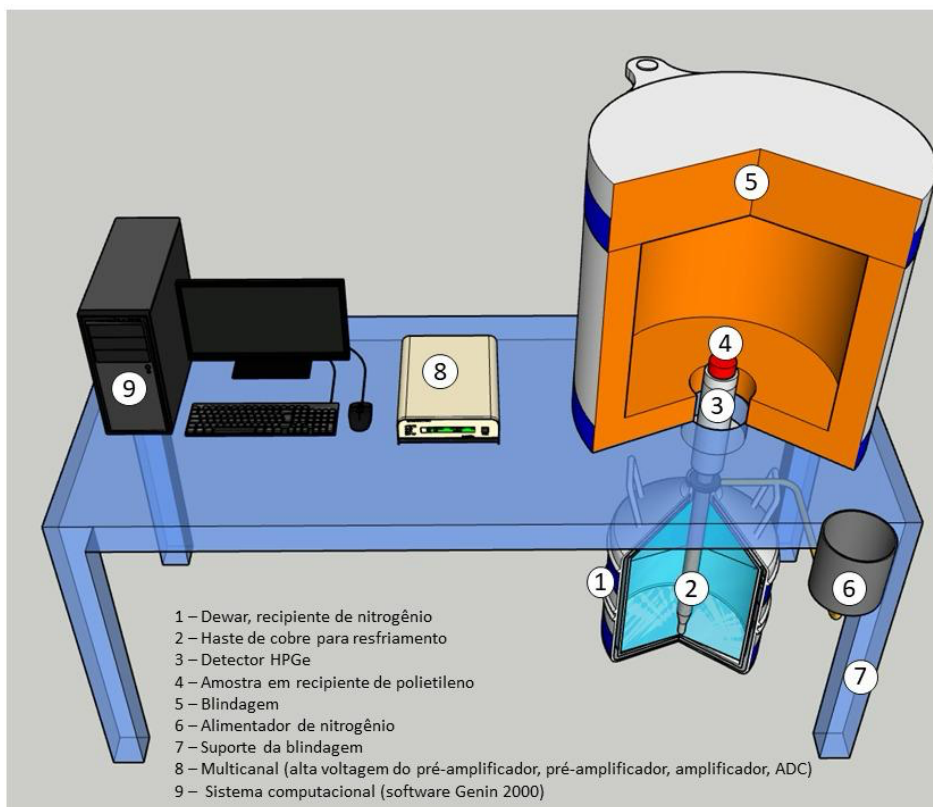
Em adição ao supracitado, o recipiente foi confeccionado em impressora 3D, marca GTMax3D, modelo A2V2, que pertence ao Grupo de Radioecologia da UFPE. A impressão foi realizada em Acrilonitrila Butadieno Estireno (por sigla do inglês: ABS), tendo dimensões próximas às do detector. Por fim, os padrões secundários foram acondicionados nos recipientes dedicados e lacrados, sendo identificados e posteriormente analisados, conforme descrito na seção 4.3.

4.3 SISTEMA DE MEDIDAS NUCLEARES E ARRANJO EXPERIMENTAL

Para as análises dos padrões de célio, foi utilizado um sistema de espectrometria gama de alta resolução, com detector semicondutor do tipo HPGe, janela de Be, da marca Canberra®, eficiência nominal de 25% e resolução de 1,8 keV para energia de 1.332 keV do ^{60}Co , conforme apresentado na Figura 3.

O detector foi envolvido por uma blindagem de $\text{Pb}^{(5)}$ com cerca de 6 cm de espessura e camadas delgadas internas constituídas de Cd e Cu. A blindagem objetivou minimizar interferências externas com as medidas realizadas no sistema de detecção, sendo as camadas delgadas utilizadas para evitar interferência dos efeitos de retroespalhamento, decorrentes da interação secundária da radiação gama com a matéria. Ainda foi interligado um sistema criogênico⁽¹⁾, que utiliza nitrogênio líquido para resfriamento à 196°C abaixo de zero.

Figura 3 - Sistema de espectrometria gama de alta resolução

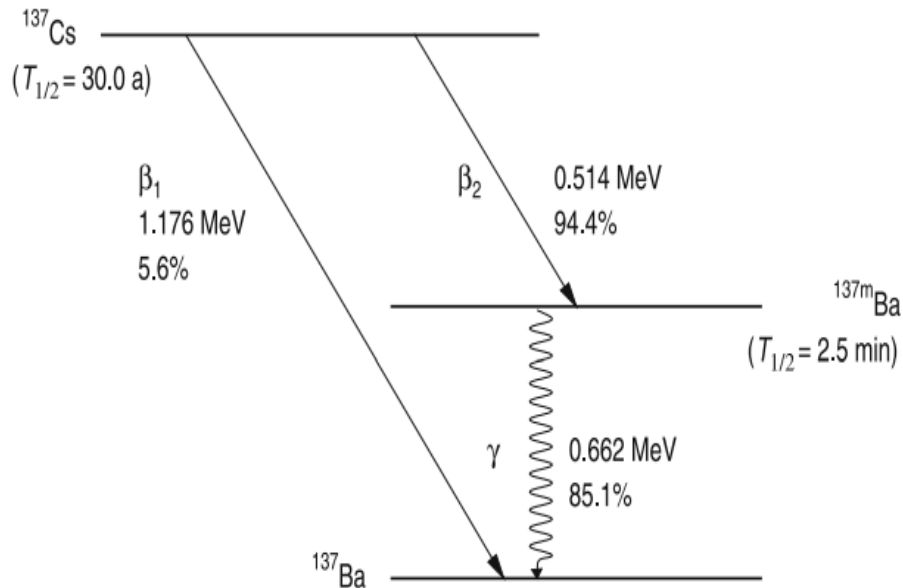


Fonte: A autora (2024), com base nos componentes do sistema de medidas.

O sistema foi acoplado a um analisador multicanal (MCA) Eagle Plus⁽⁸⁾ com 4.096 canais e a tensão do pré-amplificador ajustada em 3 kV, conforme especificação do fabricante. Para a manipulação, tratamento e análises dos espectros, foi utilizado o programa computacional Genie-2k®, também fornecido pela Canberra®.

A calibração em energia foi realizada pela correlação dos canais do MCA⁽⁸⁾ com as transições gama das fontes pontuais seladas de ^{133}Ba , ^{137}Cs e ^{60}Co e ^{22}Na , que pertencem ao Laboratório de Metrologia de Radiações Ionizantes (LMRI) do Departamento de Energia Nuclear da UFPE. As fontes foram posicionadas diretamente no detector, sem interposição de barreiras, e analisadas de forma individual durante um período de 3.600 segundos. Ao final das medidas, foi construído o modelo linearizado da calibração do sistema de detecção.

Os parâmetros físicos de eficiência em energia e resolução do sistema de medidas foram determinados diretamente pela medida do padrão secundário de ^{137}Cs na matriz de solo, fundamentados na transição gama de aproximadamente 661,66 keV, emitida pelo $^{137\text{m}}\text{Ba}$, que é formado pela transmutação do núcleo do céscio pela emissão beta, conforme detalhado na sequência de decaimento da Figura 4.

Figura 4 - Esquema de decaimento do ^{137}Cs 

Fonte: CDS – CERN (2023).

Legenda: O decaimento do ^{137}Cs (césio-137) envolve a emissão de partícula beta, resultando em $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (bário-137 metaestável). Este isótopo metaestável, por sua vez, libera o excesso de energia na forma de raios gama, decaindo para ^{137}Ba (bário-137 estável).

Para mapear a região de interesse na identificação do isótopo do césio, foi utilizado o modelo da resolução em energia, pela aplicação da Equação 5 (Knoll, 1989), sendo R a resolução em energia, $FWHM$ (do inglês: *Full Width at Half Maximum*) a largura do fotópico de interesse à meia altura, e E a energia gama emitida no decaimento radioativo.

$$R = \frac{FWHM}{E} \times 100 \quad (5)$$

Ademais, para calcular a eficiência em energia, utilizou-se da Equação 6, também definida em Knoll (1989), sendo ε a eficiência em energia, N_{Ei} a contagem da área da transição gama do ^{137}Cs , A a atividade específica do padrão corrigida para o dia da análise (Bq), t o tempo de contagem atribuído na análise (s), γ a probabilidade de emissão gama e m a massa total do padrão (kg).

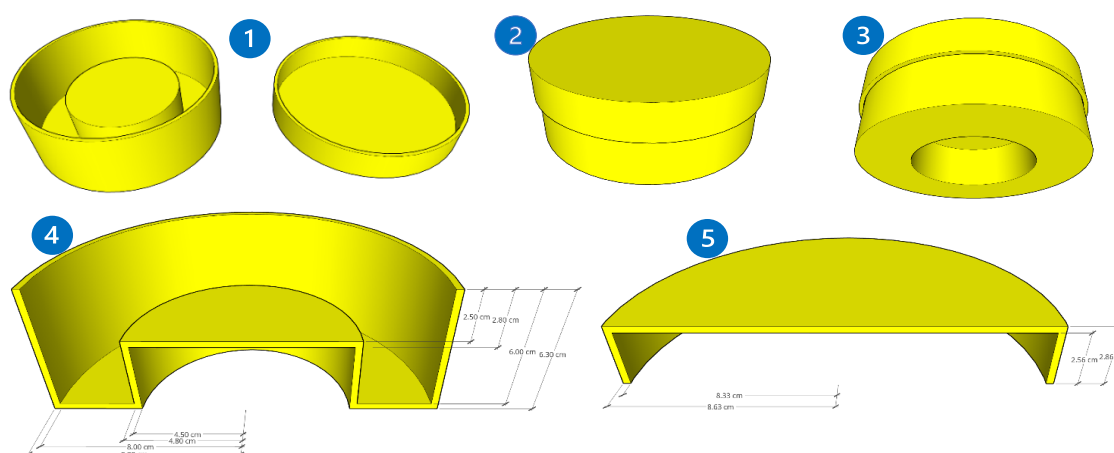
$$\varepsilon = \frac{N_{Ei}}{A \times t \times \gamma \times m} \quad (6)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 IDEALIZAÇÃO E PROJETO DO RECIPIENTE DEDICADO

Após estudos e dimensionamento da geometria, considerando os recursos do *software* Cura Ultimaker, foi desenvolvido o modelo do recipiente dedicado. Na Figura 5, tem-se, em detalhes: o recipiente completo e aberto⁽¹⁾, com percepção da estrutura interna e encaixe para adaptação do detector, situado no centro do corpo da estrutura; visão do recipiente completo e fechado⁽²⁾, cuja tampa tem encaixe por pressão; imagem com estrutura fechada e perspectiva da abertura inferior⁽³⁾ para encaixe no detector HPGe-Be; corpo e tampa em cortes perspectivados^(4, 5), respectivamente, dando ideia da estrutura interna do recipiente dedicado, incluindo as medidas planejadas em função do volume ativo do detector e da capacidade amostral.

Figura 5 - Modelo do recipiente dedicado ao HPGe-Be



- 1 Recipiente dedicado completo, com o corpo e a tampa de encaixe;
- 2 Recipiente completo e lacrado;
- 3 Recipiente em perspectiva, mostrando o encaixe na base para o detector HPGe-Be;
- 4 Corpo do recipiente em corte perspectivado;
- 5 Tampa do recipiente em corte perspectivado.

Fonte: A autora (2024).

Posteriormente, realizou-se a confecção em impressora 3D, onde a Figura 6 apresenta imagens reais dos recipientes impressos e utilizados no estudo. As diferentes cores foram utilizadas para diferenciação das concentrações dos padrões

secundários de ^{137}Cs . Para fins de comparação, a Figura 7 apresenta o recipiente convencional.

Figura 6 - Recipientes dedicados, produzidos em impressora 3D



Fonte: A autora (2024).

Figura 7 - Recipiente convencional



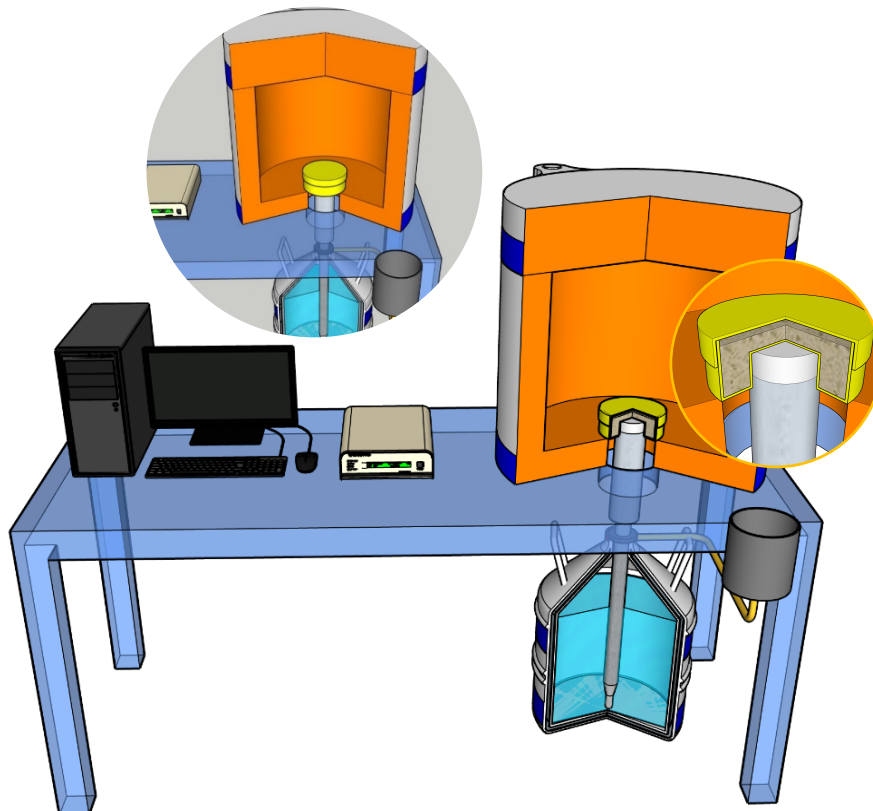
Fonte: MetorX, 2024.

Ainda no que se refere à confecção do recipiente, é importante destacar que o processo de impressão perdurou 15 horas e 34 minutos, com um custo aproximado de R\$ 24,00 por unidade, considerando material e energia para funcionamento do equipamento. Esse valor é significativamente inferior ao custo médio de *marinellis* convencionais, que é, segundo dados do fornecedor DRCT (2024), US\$ 600,00, o que equivale a R\$ 3.342,66 (BCB, 2024). Além disso, de acordo com a Lei Nº 14.902/2024, em compras e-commerce com valor de US\$ 50,01 a US\$ 3.000,00, há aplicação de 60% de impostos com dedução fixa de US\$ 20,00 (Brasil, 2024), o que aumentaria o custo do *marinelli* para US\$ 940,00 ou R\$ 5.236,83 (BCB, 2024).

5.2 ARRANJO EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO

O arranjo experimental apresentado na Figura 8 contém a geometria de posicionamento do recipiente dedicado no espectrômetro gama.

Figura 8 - Sistema de medidas com recipiente dedicado em posição de análise



Fonte: A autora (2024).

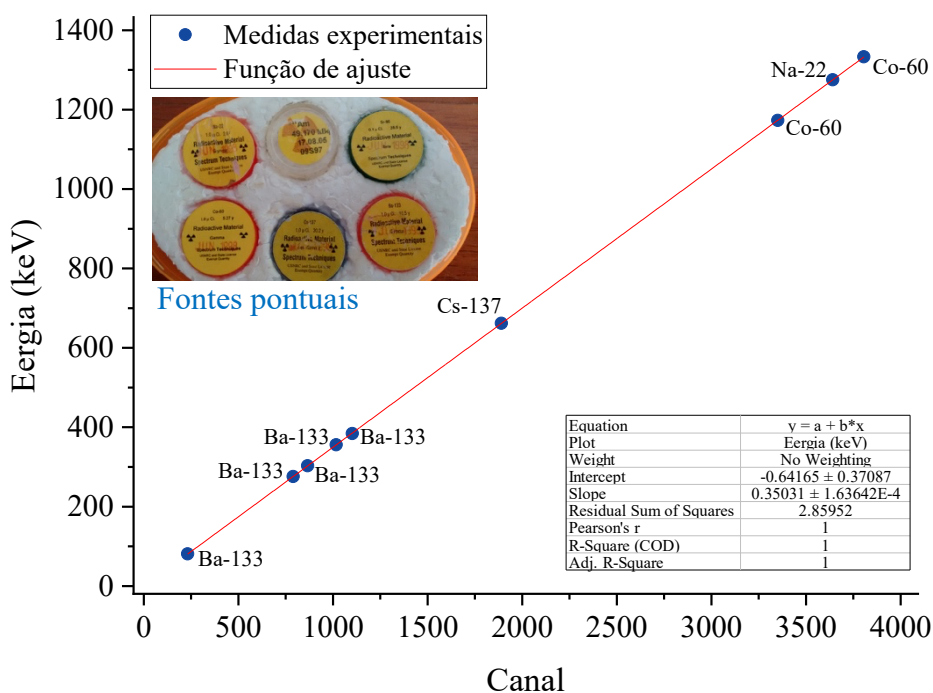
Em destaque na cor amarela, o recipiente reveste o volume ativo do detector (em corte perspectivado, para melhor visualização do encaixe) (Figura 8), conforme planejamento prévio, cuja investigação possibilitou melhorias na eficiência em energia e maior sensibilidade para quantificação do ^{137}Cs em amostras de açúcar, que passa a ser a resposta após a obtenção dos resultados e o tratamento dos dados.

5.3 CALIBRAÇÃO EM ENERGIA

A partir da calibração em energia utilizando fontes pontuais de ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co e ^{22}Na , foi definido o arranjo matemático para mapeamento e caracterização dos radionuclídeos de interesse, dentro da faixa de emissão gama caracterizada pelos emissores utilizados no experimento. Isso possibilitou definir a Equação 7, que foi inserida no sistema Genie 2k, utilizado para as aquisições e manipulações dos espectros gama, sendo E a energia da transição gama em keV e C o canal onde foi cadastrada a transição gama emitida por cada radionuclídeo, no intervalo de energia especificado na Figura 9.

$$E(\text{keV}) = 0,35031 * C - 0,64165 \quad (7)$$

Figura 9 - Calibração em energia do sistema HPGe-Be



Fonte: A autora (2024).

Pelos dados extraídos da calibração, o modelo de ajuste permitiu obter um coeficiente de correlação linear de excelência, com $r = 1$, o que atesta que o modelo pode ser aplicado no referido estudo.

5.4 PREPARAÇÃO DOS PADRÕES SECUNDÁRIOS

O preparo dos padrões secundários se deu pela adição de volumes de 10 mL e 15 mL de fonte aberta de ^{137}Cs a alíquotas de 300 g de solo de baixo *background* radioativo, com granulometria e densidade semelhantes ao açúcar VHP. Em recipientes de porcelana, essas amostras foram levadas à estufa a 60 °C, onde permaneceram até a secagem. Posteriormente, foram resfriados em dessecador e homogeneizadas em sacos plásticos de alta resistência. Na sequência, as alíquotas, agora contendo o radionuclídeo de interesse, foram transferidas para os recipientes confeccionados (Figura 10).

Figura 10 - Padrões secundários de ^{137}Cs



Fonte: A autora (2024).

Legenda: O padrão secundário de 10 mL de ^{137}Cs foi alocado no recipiente laranja, enquanto o de 15 mL, no recipiente vermelho.

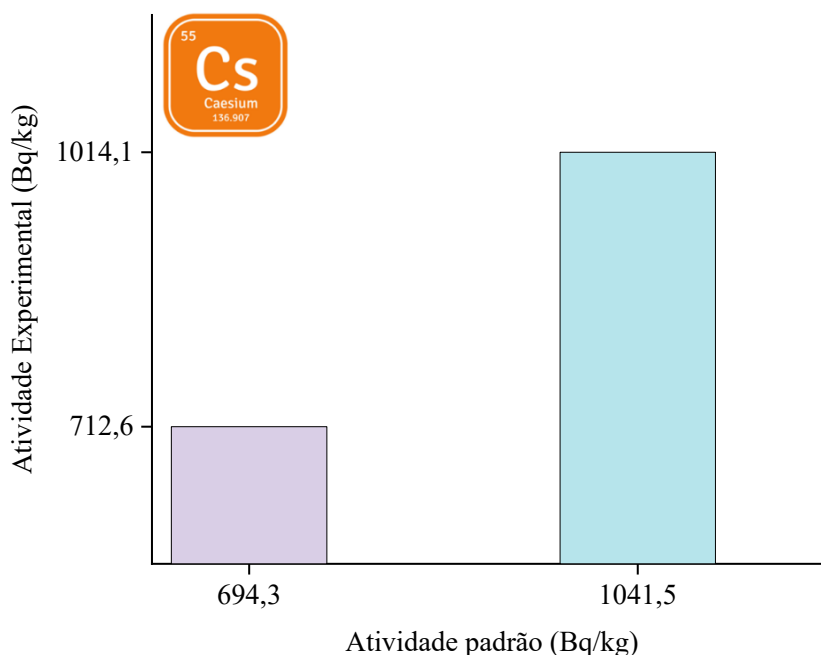
Para ampliar o isolamento e manter a estabilidade de distribuição nos recipientes dedicados, adicionou-se papel alumínio a superfície das amostras, sendo fixado com fita isolante. Os recipientes foram então lacrados e levados para as análises gama no Laboratório de Radioquímica e Análise Nuclear do Departamento de Energia Nuclear.

5.5 CERTIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO

A certificação do experimento foi realizada pelas medidas dos padrões secundários e avaliação das respostas obtidas pelo sistema de detecção. A Figura 11 apresenta os valores das atividades padronizadas, que são aquelas de referência, e os valores obtidos empiricamente.

Após análises dos dados obtidos e plotados na Figura 11, observou-se um erro relativo médio de apenas 2,6%, o que permite assegurar que o modelo de calibração atendeu aos critérios de certificação, considerando o baixo erro relativo entre as medidas de referências e os resultados obtidos com o sistema de medidas gama.

Figura 11 - Relação entre as atividades de referência e empírica



Fonte: A autora (2024).

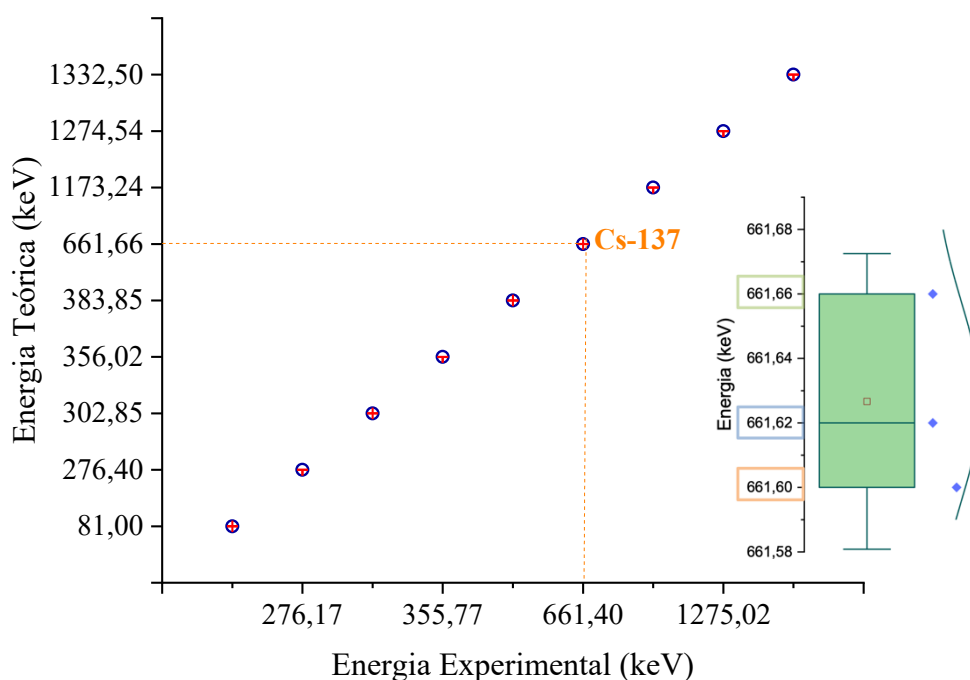
Legenda: A barra em roxo representa o padrão secundário de 10 mL de ^{137}Cs ; e a barra em azul, o padrão de 15 mL.

A certificação apresentou resultados da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos por Correia *et al.* (2023), sendo determinado pelos autores um erro máximo de 3,53%, que no limite máximo foi superior ao obtido no presente estudo.

A Figura 12 apresenta os dados empíricos e de referência para o mapeamento da transição gama associada a transmutação do ^{137}Cs , com $r \cong 1,0$. A energia teórica de 661,66 keV foi mapeada empiricamente, obtendo-se o valor de 661,61 keV, considerando como média das energias mapeadas pelas medidas dos dois padrões secundários apresentados na Figura 11, cujas atividades são diferentes.

Na Figura 12 também foi apresentado um diagrama para as energias experimentais e de referência, com valor médio definido como sendo aquele obtido do experimento. Considerando a energia teórica e o valor médio obtido empiricamente para o ^{137}Cs , observou-se um erro relativo inferior a 0,01%, sendo desprezível na caracterização do radionuclídeo.

Figura 12 - Correlação entre as transições gama experimentais e teóricas



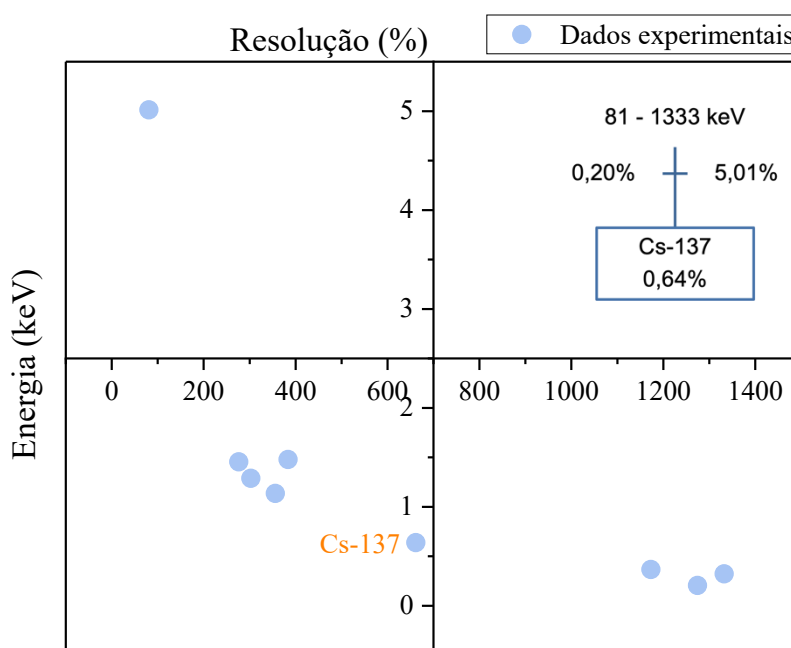
Fonte: A autora (2024).

Legenda: No bloxpot, 661,66 keV representa o valor de energia teórico; 661,62 keV corresponde ao valor encontrado para o padrão de 10 mL de ^{137}Cs ; e 661,60 keV, ao valor encontrado para o padrão de 15 mL.

No que diz respeito à resolução, primeiramente, vale ressaltar que expressa a capacidade do sistema de medidas diferenciar a transição gama do radionuclídeo de interesse na presença de outros e de interferências, sendo melhorada quanto menor o valor do R, que representa a razão entre a largura à meia altura da área que caracteriza o radionuclídeo, em função do mapeamento em canais no sistema de medidas.

Os detalhes da Figura 13 remetem ao estudo da resolução em energia, com cálculos realizados no intervalo de energia utilizado na calibração do sistema de medidas, sendo este de 81 keV a 1.333 keV, destacando-se o ^{137}Cs , objeto do presente estudo, com emissão indireta de fótons de 661,66 keV. Ademais, para o experimento em questão, o valor da resolução foi considerado como sendo excelente, uma vez que o R foi de apenas 0,64%, com pequena largura do fotópico associado à região de interesse utilizada para caracterizar o isótopo de césio. O resultado deste trabalho se assemelha ao obtido por Correia *et al.* (2023). Para os experimentos tradicionais, normalmente o valor da resolução em energia supera 3%, com o presente estudo apresentando resultado de quase 5 (cinco) vezes inferior.

Figura 13 - Resolução em energia para o sistema de medidas

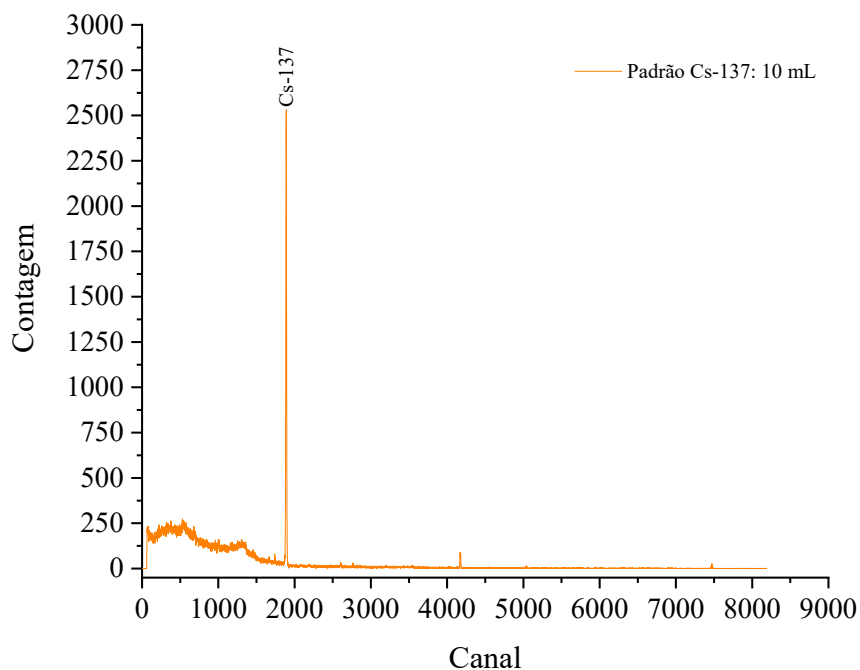


Fonte: A autora (2024).

As Figuras 14 e 15 apresentam os espectros gama obtidos para os padrões de ^{137}Cs referenciados na Figura 11, para volumes de 10 mL e de 15 mL do radionuclídeo, respectivamente. Nota-se que nas duas situações ocorre exatidão na caracterização do isótopo do célio, mesmo os padrões apresentando atividades diferentes, 694,3 Bq/kg e 1.041,5 Bq/kg. Nota-se regiões de interesse (canal) semelhantes para os dois experimentos, como desejado teoricamente. Pequeno deslocamento da região do Compton contínuo se deve as diferenças nas concentrações dos padrões usados na experimentação, onde ocorre mudanças nas escalas.

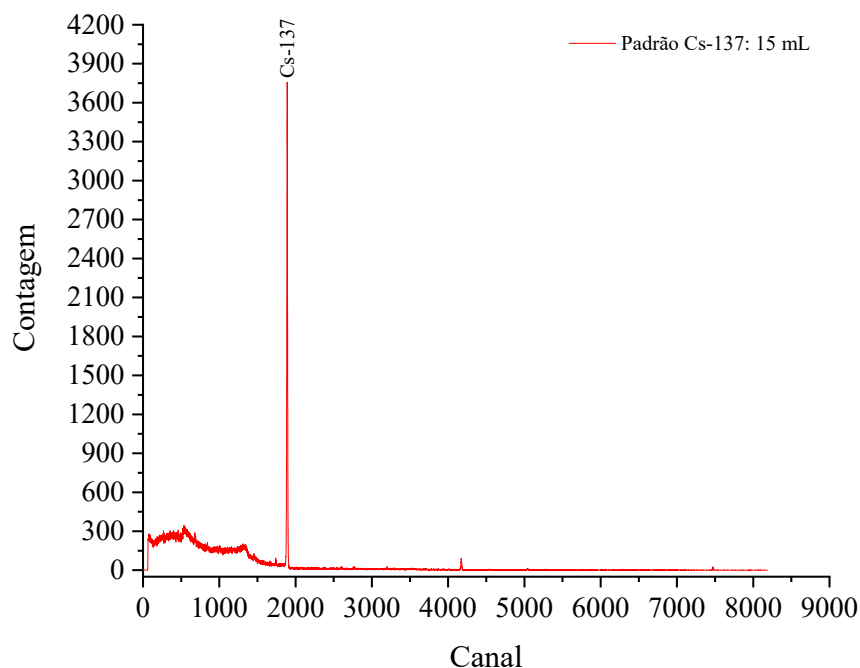
Em ambos os espectros, não se observa nenhuma variação da região de interesse utilizada para caracterização do radionuclídeo, apenas alteração na escala do eixo das ordenadas, isto devido ao incremento do radionuclídeo no padrão mais ativo, ou seja, aquele representado na Figura 15. Outra característica importante é que, tratando-se de mesmo padrão radioativo, como esperado teoricamente (Montanheiro; Filho; Pinto, 1977), não ocorreu flutuações na região do Compton contínuo, nem no Edge (região anterior àquela utilizada para caracterizar os fótons do radionuclídeo de interesse no estudo).

Figura 14 - Espectros gama para o padrão com 10 mL ^{137}Cs



Fonte: A autora (2024).

Figura 15 - Espectros gama para o padrão com 15 mL ^{137}Cs



Fonte: A autora (2024).

Para garantia da fidedignidade dos resultados e segurança na avaliação do isótopo de césio considerado, foi determinado o limite de quantificação, considerando a aplicação da Equação 4 (Currie, 1968; Correia, 2019) descrita anteriormente, cujos resultados para os dois padrões secundários considerados no estudo foram detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites de Quantificação (LQ) para os padrões secundários

MEDIDA	LQ (Bq/kg)
Fonte 10 ml ^{137}Cs	2,16
Fonte 15 mL ^{137}Cs	2,20
Média (fontes)	2,18
Desvio médio	0,03
CV (%)	1,30

Fonte: A autora (2024).

Pelos dados calculados, observa-se baixa dispersão dos resultados das medidas das duas fontes secundárias de ^{137}Cs , que teve como dado de entrada as

contagens obtidas nos valores das incertezas de cada medida. Na prática, foi obtido um valor médio e desvio de aproximadamente $2,18 \pm 0,03$ Bq/kg para LQ, sendo considerado bem abaixo do valor limite para o césio em alimento, que é, segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear, de 1,0 kBq/kg (CNEN, 2024). Ou seja, o valor encontrado foi quase 459 vezes inferior à faixa máxima da referência, atendendo a confiança requerida na quantificação do radionuclídeo.

6 CONCLUSÃO

O modelo geométrico do recipiente desenvolvido atendeu as conformações do sistema de medidas. Os experimentos comprovaram alta resolução para a faixa de energia considerada, principalmente na região de interesse da caracterização do ^{137}Cs , objeto do estudo.

A capacidade de quantificação do isótopo do cézio se mostrou dentro do que se espera para realização de medidas nucleares com a confiança requerida. Além disso, é importante destacar que, quando comparado aos modelos convencionais, o recipiente em questão apresentou um custo reduzido.

O presente estudo possibilitou desenvolver um modelo de calibração eficiente e econômico para o espectrômetro gama do tipo HPGe-Be para análise de ^{137}Cs em açúcar destinado à exportação. Tal avanço reforça o controle de qualidade e a segurança alimentar, além de fortalecer o compromisso com a nutrição e saúde pública.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARINE, Bruno Burini Robles. **Melhoramento do índice de detecções na espectrometria gama em amostras ambientais usando inteligência artificial**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2017.

ASHRAF, Muhammad Aqeel *et al.* Cesium-137: radio-chemistry, fate, and transport, remediation, and future concerns. **Critical reviews in environmental science and technology**, v. 44, n. 15, p. 1740-1793, 2014.

Banco Central do Brasil – BCB. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/conversao>. Acesso em: 14 de setembro de 2024.

BRASIL. **Lei Nº 11.346, de 15 de setembro de 2006**. Diário Oficial da União, v. 143, n. 179, p. 1-2, 2006.

BRASIL. **Lei Nº 14.902, de 27 de junho de 2024**. Presidência da República, Casa Civil, Secretaria Especial de Assuntos Jurídicos, 2024.

BRASIL. **Resolução Nº 12, de 1978**. Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos, Diário Oficial da União, 1978.

CARDOSO, Eliezer de Moura. **Apostila Educativa: A Energia Nuclear**. 3ª Edição. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação; Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/material-divulgacao-videos-imagens-publicacoes/publicacoes-1/apostilaeducativaaplicacoesinfantojuvenil.pdf>. Acesso em: 15 de setembro de 2024.

CARVALHO, Bruna de Oliveira. **Açúcares: uma análise das informações difundidas pela mídia leiga e o grau de respaldo das pesquisas científicas**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública, 2019.

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. **Requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação**. Resolução CNEN 323/24. 2024.

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. **Resolução CNEN Nº 102**. Diário Oficial, Imprensa Universitária, nº. 88, seção 1, p. 7, 2011.

CORREIA, Filipe Lopes de Barros. **Determinação e padronização de modelo semiempírico para investigação radioquímica do ¹³⁴CS e ¹³⁷CS em amostras de açúcar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. 2019.

CORREIA, Felipe Lopes de Barros *et al.* Radioanalytical models applied to the investigation of caesium signatures in sugar samples. **Food Additives & Contaminants: Part A**, v. 40, n. 3, p. 404-414, 2023.

CROUTHAMEL, Carl Eugene; ADAMS, Freddy; DAMS, Richard. Applied gamma-ray spectrometry. **Elsevier**, 2013.

CURRIE, Lloyd A. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry. **Analytical chemistry**, v. 40, n. 3, p. 586-593, 1968.

Direct Scientific – DRCT. Disponível em: https://www.drct.com/nuclear/index.php?main_page=index&cPath=7. Acesso em: 14 de setembro de 2024.

EISENBUD, Merrill; GESELL, Thomas. **Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources**. Academic Press, p. 656, 1997.

FRAGOSO, Maria da Conceição de Farias *et al.* **Metodologia para determinação da atividade de radionuclídeos por sistema de espectrometria gama**. 1º Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes, 2014.

GARCÊZ, Ricardo Washington Dutra. **A radiação gama no feijão com arroz**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Fluminense, Instituto de Física, 2016.

GAVRILESCU, Maria; PAVEL, Lucian Vasile; CRETESCU, Igor. Characterization and remediation of soils contaminated with uranium. **Journal of hazardous materials**, v. 163, n. 2-3, p. 475-510, 2009.

GIANNAKOPOULOU, Foteini *et al.* Sorption behavior of cesium on various soils under different pH levels. **Journal of Hazardous Materials**, v. 149, n. 3, p. 553-556, 2007.

GODYŃ, Piotr *et al.* Estimation of the committed radiation dose resulting from gamma radionuclides ingested with food. **Journal of radioanalytical and nuclear chemistry**, v. 299, p. 1359-1364, 2014.

GUIMARÃES, Maria de Fátima. **Césio-137 da precipitação radioativa (“Fallout”) no estudo da erosão e sedimentação de solo**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1988.

International Atomic Energy Agency - IAEA. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. **IAEA-TECDOC-1363**. Vienna, 2003.

KNOLL, Gleen F. **Radiation Detection and Measurement**. Editora John Wiley&Sons, 1989.

KNOLL, Gleen F. **Radiation Detection and Measurement**. 4ª ed. Editora John Wiley&Sons, 2010.

L’ANNUNZIATA, Michael F. **Handbook of Radioactivity Analysis**. 2ª ed. Editora Academic Press, 2003.

LOPES, Cláudio Hartkopf. **Tecnologia de produção de açúcar de cana**. Universidade Federal de São Carlos, 2017.

LOPES, José Marques. **Dose efetiva comprometida devida aos radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th contidos nos alimentos da dieta da população do Estado do Rio de Janeiro**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, 2018.

MACEDO, Máyla Alexandra; MARJOTTA-MAISTRO, Marta Cristina. Potencial do Mercado Doméstico para o Açúcar VHP. **Revista de economia e sociologia rural**, v. 1, p. 978-85-98571-13, 2015.

MACHADO, Simone Silva. **Tecnologia da fabricação do açúcar**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2012.

MANDRO, Juliana Lorenz. **Processo de peroxidação de açúcar tipo VHP na produção de açúcar refinado: implicações químicas, tecnológicas e microbiológicas**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2016.

MAZZILLI, Barbara Paci; MÁDUAR, Marcelo Francis; CAMPOS, Márcia Pires. **Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MetorX. **Marinelli beakers catalog**. Disponível em: https://www.metorx.com/sites/default/files/inline-files/metorX%20GA-MA-Marinelli%20beaker%20catalog_0.pdf. Acesso em: 18 de outubro de 2024.

MONTANHEIRO, Maria Nazareth S.; FILHO, Virgílio F. Nascimento; PINTO, Fernando A. **Introdução à Espectrometria Gama**. Boletim Didático, USP - CNEN, 28p, 1977. Disponível em: http://www.cena.usp.br/biblioteca/repositorio/boletim_didatico_021.pdf. Acesso em: 14 de setembro de 2024.

National Institutes of Health - NIH. **OPEN Chemistry Database, Sucrose**. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/sucrose#section=Top>. Acesso em: 13 de setembro de 2024.

OKUNO, Emico. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos avançados**, v. 27, p. 185-200, 2013.

OLIVEIRA, Lorryayne Guimarães *et al.* Como a genética contribuiu para compreender os efeitos biológicos da exposição humana à radiação ionizante de Césio-137?. **Genética na Escola**, v. 17, n. 2, p. 158-167, 2022.

RIBAS, Roberto V. **Instrumentação nuclear**. Instituto de Física, Departamento de Física Nuclear da Universidade de São Paulo, 2018.

SANTOS, Eliane Eugênia. **Radionuclídeos naturais e metais pesados em vegetais da dieta da população da cidade do Rio de Janeiro**. Tese de doutorado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, 2002.

SANTOS JÚNIOR, José Araújo. **Avaliação radiométrica do U-238, Ra-226, Th-232 e K-40 em uma área anômala do agreste de Pernambuco**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear, 2009.

SANTOS JÚNIOR, José Araújo *et al.* Determination of radionuclides in the environment using gamma-spectrometry. **Journal of radioanalytical and nuclear chemistry**, v. 269, n. 2, p. 451-455, 2006.

SCAPIN, Tailane; FERNANDES, Ana Carolina; PROENÇA, Rossana Pacheco da Costa. Açúcares de adição: definições, classificações, metabolismo e implicações à saúde. **Revista de Nutrição**, v. 30, n. 5, p. 663-677, 2017.

SILVA, Éric Novais; PADILHA, Eliandro José. **Física moderna: o caso da radiação**. 2019.

SZABÓ, Katalin Zsuzsanna *et al.* Cesium-137 concentration of soils in Pest County, Hungary. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 110, p. 38-45, 2012.

United Nations Environment Programme - UNEP. **Radiação: efeitos e fontes**. 2016.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR. **Sources and effects of ionizing radiation**. New York, USA, 1993.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR. **Sources and effects of ionizing radiation**. New York, USA, 2000.

U.S. Department of Agriculture – USDA. **European Union: Sugar semi-annual**. FAS/USDA. 2023. Disponível em: <https://fas.usda.gov/data/european-union-sugar-semi-annual-2>. Acesso em: 16 de setembro de 2024.

VIDAL, Maria de Fátima. **Açúcar**. Banco do Nordeste, Caderno Setorial ETENE, Ano 8, Nº 314, Novembro, 2023. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1913/1/2023_CDS_314.pdf. Acesso em: 16 de setembro de 2024.

Wikipédia – A enciclopédia livre. **Espectro eletromagnético**. 2015. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_eletromagnético. Acesso em: 15 de setembro de 2024.