

UnB - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FGA - FACULDADE GAMA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
BIOMÉDICA

**DETERMINAÇÃO DAS DOSES EFETIVAS DE ALIMENTOS,
ÁGUA E SOLO NA REGIÃO DO CAUB I ATRAVÉS DA
ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA**

KATRINE CAPPUCIO FERREIRA

ORIENTADOR(A): Dr (a). LEANDRO XAVIER CARDOSO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA
BIOMÉDICA**

PUBLICAÇÃO: 080A/2018

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2018

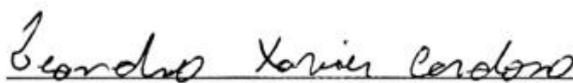
UnB - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FGA - FACULDADE GAMA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
BIOMÉDICA

**DETERMINAÇÃO DAS DOSES EFETIVAS DE ALIMENTOS,
ÁGUA E SOLO NA REGIÃO DO CAUB I ATRAVÉS DA
ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA**

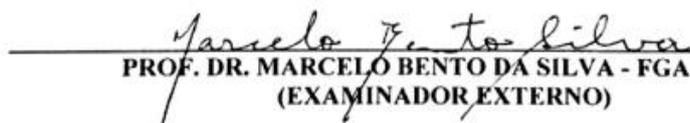
KATRINE CAPPUCIO FERREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA DA FACULDADE GAMA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA BIOMÉDICA.

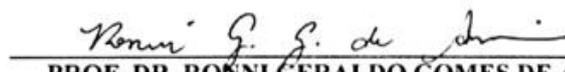
APROVADA POR



PROF. DR. LEANDRO XAVIER CARDOSO – FGA / UNB
(ORIENTADOR)



PROF. DR. MARCELO BENTO DA SILVA - FGA / UNB
(EXAMINADOR EXTERNO)



PROF. DR. RONNI GERALDO GOMES DE AMORIM – FGA / UNB
(EXAMINADOR INTERNO)

BRASÍLIA/DF, 23 DE FEVEREIRO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

KATRINE CAPPUCIO FERREIRA

DETERMINAÇÃO DAS DOSES EFETIVAS DE ALIMENTOS, ÁGUA E SOLO NA REGIÃO DO CAUB I ATRAVÉS DA ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA, [Distrito Federal] 2018.

No. 080A/2018 p., 210 x 297 mm (FGA/UnB Gama, Mestre, Engenharia Biomédica, 2018). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade Gama. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica.

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1. RADIONUCLÍDEOS | 2. ESPECTROMETRIA GAMA |
| 3. DOSE EFETIVA | |
| I. FGA UnB Gama/ UnB. | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, K. C. (2018). DETERMINAÇÃO DAS DOSES EFETIVAS DE ALIMENTOS, ÁGUA E SOLO NA REGIÃO DO CAUB I ATRAVÉS DA ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA. Dissertação de Mestrado em Engenharia Biomédica, Publicação 080A/2018, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, Faculdade Gama, Universidade de Brasília, Brasília, DF, no.p 69.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: KATRINE CAPPUCIO FERREIRA

TÍTULO: DETERMINAÇÃO DAS DOSES EFETIVAS DE ALIMENTOS, ÁGUA E SOLO NA REGIÃO DO CAUB I ATRAVÉS DA ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA

GRAU: Mestre

ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA UNB. ST. LESTE PROJEÇÃO A - GAMA LESTE
CEP 72444-240 BRASÍLIA, DF – BRASIL.

DEDICATÓRIA

Para minha família, com amor.

A tarefa de viver é dura, mas fascinante.

Ariano Suassuna.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Deuses pela oportunidade de existência neste vasto universo.

Agradeço ainda a:

Meu noivo Jorge Bittar Júnior, pelo apoio incondicional, tanto no mestrado, como na vida, por todos os conselhos e orientações e pela sabedoria.

Chewie que tanto nos alegrou e ensinou sentimentos que nem sabíamos que possuíamos.

Minha família: Meu pai Jairo, minha mãe Isa, meu irmão Diego, minha prima Isabella, os quais me incentivam em vários momentos de minha vida.

Meu orientador Leandro Xavier Cardoso pelo aprendizado, conselhos e apoio.

A todos os professores do mestrado que compartilharam tanto saber e alegria nesta caminhada longa, em especial o professor Cristiano Jacques por todo o conhecimento, paciência e dedicação na arte de ensinar, grande fonte de inspiração.

Agradeço aos membros da banca, professores Marcelo Bento e Ronni Amorim pelas contribuições extremamente relevantes para crescimento do trabalho.

À secretária Denise, por todo respeito e gentileza que nos dispensou.

Ao Laboratório de Monitoração Ambiental (LMA) onde foram realizadas as leituras das amostras, que cedeu o equipamento para os testes.

À Capes pelo apoio financeiro, que propiciou o desenvolvimento deste trabalho.

A Dr Marli que com tanto carinho revisou esta dissertação.

RESUMO

DETERMINAÇÃO DAS DOSES EFETIVAS DE ALIMENTOS, ÁGUA E SOLO NA REGIÃO DO CAUB I ATRAVÉS DA ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA

Autor: KATRINE CAPPUCIO FERREIRA

Orientador: Prof. Dr. LEANDRO XAVIER CARDOSO

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica
Brasília, fevereiro de 2018.**

Estudo de índices de radioatividade no ambiente tem grande importância no monitoramento de níveis de radiação a que o homem está exposto, seja direta ou indiretamente. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo a determinação experimental das doses efetivas de radiação natural e artificial presentes em alimentos, água, solo e fertilizante, na região administrativa produtora de alimentos CAUB-I, localizada no Distrito Federal. Para tal, foram coletados e analisados através da técnica de espectrometria Gama cuja atividade foi medida empregando-se detector HPGe (High Pure Germanium). Os resultados obtidos mostraram o elemento Bismuto (^{210}Bi) encontrado em amostras de solo com atividade reduzida variando entre $5,47 \pm 0,03$ e $12,57 \pm 0,13 \text{ Bq/kg}^{-1}$ enquanto o elemento Chumbo (^{210}Pb) apresentou valores entre $10,55 \pm 0,14$ a $55,5 \pm 0,50 \text{ Bq/kg}^{-1}$. Em praticamente todas as amostras de água foi detectado a presença do elemento Potássio (^{40}K) com variação entre 4,02 a $15,4 \text{ Bq/kg}^{-1}$. A amostra de fertilizante apresentou os elementos ^{40}K e o ^{235}U , sabe-se que os outros elementos estão na cadeia de decaimento do Urânio; sendo assim podemos considerar que toda a cadeia está contaminada com esses radionuclídeos. A dose efetiva calculada foi abaixo dos valores da UNSCEAR e do CENEN, entretanto não exime a contaminação da população pelos radionuclídeos.

Palavras-chaves: RADIONUCLÍDEOS, ESPECTROMETRIA GAMA e DOSE EFETIVA.

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE DOSES OF FOODS, WATER AND GROUND IN THE REGION CAUB I THROUGH THE GAMMA SPECTROMETRY TECHNIQUE

Author: KATRINE CAPPUCIO FERREIRA

Supervisor: Dr. LEANDRO XAVIER CARDOSO

Post-Graduation Program in Biomedical Engineering

Brasília, February of 2018.

Study of radioactivity indices in the environment is of great importance without monitoring of levels of radiation to whom the man is exposed, either directly or indirectly. In this sense, the objective of this work was the experimental determination of the effective doses of natural and artificial radiation present in food, water, soil and fertilizer in the administrative region of food CAUB-I, located in the Federal District. For the control of HPGe (High Pure Germanium). The results showed the Bismuth element (^{210}Bi) found in soil samples with reduced activity ranging from 5.47 ± 0.03 to 12.57 ± 0.13 Bq/kg⁻¹ while the element Lead (^{210}Pb) presented values between $10,55 \pm 0.14$ to 55.5 ± 0.50 Bq/kg⁻¹. In practically all the water samples to detect a presence of the element Potassium (^{40}K) with variation between 4.02 to 15.4 Bq/kg⁻¹. A sample of fertilizer showed the elements ^{40}K and ^{235}U , other elements are known to be in the Uranium decay chain; Be well informed with these radionuclides. An effective dose calculated and below the values of UNSCEAR and CENEN, between which there is no contamination of the population by radionuclides.

Key-words: Radionuclides; Gamma spectrometry; Effective dose.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Contextualização	15
1.3	Objetivos	17
1.3.3	Objetivo geral	17
1.3.2	Objetivos específicos.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Radiação ambiental.....	18
2.2	ORIGEM DOS RADIONUCLÍDEOS NATURAIS	18
2.3	CADEIAS RADIOATIVAS	21
2.4	LOCALIZAÇÃO DOS RADIONUCLÍDEOS NA NATUREZA	23
2.5	RADIOATIVIDADE ARTIFICIAL.....	24
2.6	RADIONUCLÍDEOS EM ALIMENTOS	25
2.7	RADIAÇÃO IONIZANTE PROVENIENTE DOS RADIONUCLÍDEOS	26
2.8	DECAIMENTO RADIOATIVO.....	28
2.9	EQUILÍBRIO RADIOATIVO	29
2.10	EQUILÍBRIO SECULAR	30
2.11	EQUILÍBRIOTRANSIENTE.....	30
2.12	RADIONUCLÍDEOS E SEUS EFEITOS NO ORGANISMO HUMANO	31
2.13	INTERAÇÃO RADIAÇÃO X MATÉRIA	33
2.13.1	Efeito Compton.....	33
2.13.2	Efeito fotoelétrico	34
2.13.3	Produção de pares	36
3	INSTRUMENTAÇÃO.....	37
3.1	ESPECTROMETRIA GAMA.....	37
3.2	DETECTOR DE GERMÂNIO HIPER-PURO (HPGE)	37
3.3	EFICIÊNCIA DE DETECÇÃO	40

3.4 BLINDAGEM	41
3.5 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA.....	41
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
4.1 ÁREA AMOSTRADA.....	43
4.1.1 Região Administrativa do Riacho Fundo II (CAUB I).....	43
4.2 PROCEDIMENTO DE COLETA E PREPARO EM LABORATÓRIO.....	45
4.2.1. - Procedimento para coleta de amostras	45
4.2.2 Procedimento de preparação de amostras.....	46
4.2.3 Procedimentos e equipamentos para espectrometria gama.....	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.1 Amostras de solo	48
5.2 Amostras de alimentos	51
5.3 Amostras de água	53
5.4 Amostras de fertilizante.....	56
8 RADIONUCLÍDEOS X HOMEM.....	58
7 CÁLCULO DA DOSE EFETIVA	60
7 CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
ANEXOS.....	68
ANEXO 1: TABELAS DE REFERÊNCIA DE CÁLCULO DE DOSE	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produtos iniciais e finais das séries radioativas (BURCHAM, 1974).....	21
Tabela 2: Tempo de meia-vida dos radionuclídeos	32
Tabela 3:Relação de amostras pesquisadas no trabalho	46
Tabela 4: Limites CNEN PR-3.01-001 (Bq/Kg ⁻¹)	48
Tabela 5: Presença de radionuclídeos nas amostras de solo	49
Tabela 6: Atividade no solo dos radionuclídeos ⁴⁰ K e ²³⁵ U (Bq/kg ⁻¹).....	50
Tabela 7: Presença de radionuclídeos nas amostras de alimentos.....	51
Tabela 8: Atividade nos alimentos dos radionuclídeos ⁴⁰ K e ²³⁵ U (Bq/kg ⁻¹).....	52
Tabela 9: Presença de radionuclídeos nas amostras de água	54
Tabela 10: Atividade na água dos radionuclídeos ⁴⁰ K e ²³⁵ U (Bq/kg ⁻¹).....	55
Tabela 11: Presença de radionuclídeos nas amostra de fertilizante.....	56
Tabela 12: Atividade nos fertilizantes dos radionuclídeos ⁴⁰ K e ²³⁵ U (Bq kg ⁻¹)	57
Tabela 13: Dose Efetiva da Macaxeira em 1 ano (Sv/a)	61
Tabela 14: Dose Efetiva de Farinha de mandioca em 1 ano (Sv/a).....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de decaimento radioativo do isótopo ^{40}K (UMISEDO, 2007)	20
Figura 2 - Decaimento radioativo da série do ^{238}U (EGGEBERT-SEELMANN et al., 1974). 22	22
Figura 3 - Decaimento radioativo da série do ^{235}U (EGGEBERT-SEELMANN et al., 1974). 22	22
Figura 4 - Decaimento radioativo da série do ^{232}Th (EGGEBERT-SEELMANN et al., 1974) 23	23
Figura 5 - Representação da penetração das radiações ionizantes < Acesso em 25-03-2017 às 22:15 https://www.dreamstime.com/stock-illustration-radioactivity-penetration-range-alpha-beta-gamma-radiati-radiation-image44802330 >	28
Figura 6 – Representação esquemática para o efeito Compton (KNOLL; WILEY, 2000).....	33
Figura 7 – Esquema do efeito fotoelétrico (WALKER, 2011).	35
Figura 8 - Produção de um par de elétron-pósitron e aniquilação sucessiva deste último (KNOLL; WILEY, 2000).....	36
Figura 9 - Diagrama em blocos de um sistema típico de Espectrometria de raios Gama (Adaptado: VASCONCELOS, 2010).....	39
Figura 10 - Equipamento Espectrometria Gama (GARCÊZ, 2016)	39
Figura 11 - Espectro de pulsos de radiação γ monoenergética (CARDOSO, 2014).	40
Figura 12 - Recipiente porta amostra do tipo Marinelli. (RODRIGUES; KASTNER, 2011)..	42
Figura 13 - Esquema de medida utilizando recipiente porta amostra do tipo Marinelli (RODRIGUES; KASTNER, 2011).	42
Figura 14: Mapa da região do CAUB I (Autoria própria).....	44
Figura 15: Gráfico das amostras do solo e seus radionuclídeos em relação às atividades que emitiram durante a análise de Espectrometria Gama.	51
Figura 16: Gráfico das amostras de alimentos e seus radionuclídeos em relação às atividades que emitiram durante a análise de Espectrometria Gama.	53
Figura 17: Gráfico das amostras de água e seus radionuclídeos em relação às atividades que emitiram durante a análise de Espectrometria Gama.	55
Figura 18: Gráfico da amostra de fertilizante e seus radionuclídeos em relação às atividades que emitiram durante a análise de Espectrometria Gama.	58
Figura 19 - Fluxograma da representação dos radionuclídeos desde os fertilizantes até o homem	59

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements

ICRP - International Commission on Radiological Protection

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

HPGe - Detector de Germânio Hiper-Puro

FT - Fator de Transferência

^{235}U - Urânio 235

^{238}U - Urânio 238

^{40}K - Potássio 40

^{232}Th - Tório 232

^{212}Bi - Bismuto 212

^{214}Bi - Bismuto 214

^{212}Pb - Chumbo 212

^{214}Pb - Chumbo 214

^{40}Ca - Cálcio 40

^{222}Ra - Rádio 222

^{226}Ra - Rádio 226

^{218}Po - Polônio 218

^{137}Cs - Césio 137

^3H - Trítio

^7Be - Berílio 7

^{14}C - Carbono 14

^{22}Na - Sódio 22

^{85}Kr - Kriptônio 85

Ba - Bário

Sr - Estrôncio

Ra - Rádío

$\mu\text{Sv/ano}$ - Microsiviert/ano

Bq/L - Becquerel/litro

Bq/Kg - Becquerel/kilograma

mSv/ano - Milisiviert/ano

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na sociedade e nos serviços de saúde há uma grande preocupação com as radiações ionizantes. Após a descoberta do raio X e da radioatividade, a sociedade ainda não estava preparada para os cuidados necessários que tais radiações necessitavam, com isso houve um uso descomedido dessas radiações e a partir dessas explorações algumas comissões foram criadas nos países afim de fiscalizar o uso dessas radiações. Dentre elas a *International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)*, com o objetivo de definir grandezas e medidas da física das radiações e critérios para medir a radiação. Em seguida foi criado o *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*, com o intuito de elaborar limites máximos da radiação nos seres humanos e normas de proteção radiológica. No Brasil, a fiscalização está a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) que rege os serviços de saúde e áreas de risco de contaminação pelas radiações ionizantes (NOUAILHETAS et al., 2008).

Entende-se por radiação ionizante a energia que pode penetrar nos átomos e moléculas alterando sua estrutura (PANAMERICANA, 1959). A nocividade das radiações ionizantes nos seres humanos está vinculada a vários fatores, como a dose absorvida (baixa ou alta), taxa de exposição (crônica ou aguda) e forma da exposição. Independente da dose, assim que ela for absorvida, pode desencadear reações como morte de células, câncer. O que irá discernir esse fato é a probabilidade do dano, ou seja, as mutações que originam o câncer e as células mortas (OKUNO, 2013).

Os efeitos das radiações ionizantes variam de acordo com a quantidade e a qualidade da incidência. Esse tipo de radiação é conhecido pelo processo de transmissão de energia, podendo ser classificadas em diretamente ionizantes, cujos exemplos são as partículas alfa, beta e prótons ou indiretamente ionizantes como raios X, raios gama e nêutrons (FONSECA, 2009).

Para as radiações ionizantes o comportamento em relação ao organismo consegue ser bem variado, pois cada organismo interpreta a radiação de uma forma diferente, sendo capaz

ou não de desencadear algum tipo de malefício, como: lesões degenerativas, efeitos carcinogênicos, entre outros (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Neste contexto de radiações ionizantes podemos destacar os radionuclídeos, que são provenientes de elementos radioativos como o urânio, tório, actíneo e o potássio, inerentes aos materiais minerais (FONSECA, 2009). Em relação aos radionuclídeos básicos, por exemplo, ^{232}Th , ^{238}U e ^{40}K , ambos estão presentes no solo em geral, e suas concentrações podem variar em relação à natureza da rocha. Os radionuclídeos são incorporados nas plantas, juntamente com os nutrientes e chegam a partes comestíveis, situação em que quando ingeridos pelo homem acometem reações que vão desde vômitos até câncer (SHANTHI et al., 2012).

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em relação aos radionuclídeos, a exposição nos seres humanos pode ser externa e interna. Quanto à exposição externa destacam-se os radionuclídeos cosmogênicos e elementos radioativos existentes no ambiente, no solo e em rochas. A exposição de 95% da população à radiação se dá entre 0,3 e 0,6 mSv/ano, salientando que a dose máxima permitida é 1mSv/ano. No caso de exposição interna, estima-se que aproximadamente 2/3 de dose de radiação que os seres humanos recebem advém de fontes naturais como o ar, os alimentos e a água. Um exemplo é o elemento potássio - 40 (^{40}K) onde o homem recebe aproximadamente 180 $\mu\text{Sv/ano}$, ou seja, quando ingerimos uma banana juntamente com seus nutrientes há o potássio radioativo (^{40}K) (FABIANA, 2012). Temos então que os fertilizantes, o solo e a água são as principais fontes de contaminação da cadeia alimentar que chega até o homem.

A incidência de radionuclídeos em águas subterrâneas ocorre devido a fatores do próprio aquífero e presença de elementos primordiais como urânio e tório. Para o monitoramento desses radionuclídeos no Brasil o Ministério da Saúde estabelece doses de atividade de 0,1 Bq/L para partículas alfa e 1Bq/L para partículas beta (PESSOA; SANTOS, 2010).

A contaminação dos radionuclídeos na água pode passar para os elementos radioativos presentes no solo que são transferidos para as plantas de acordo com sua disponibilidade e

da necessidade da planta, uma vez que a mesma não pode diferenciar um nutriente de um radionuclídeo. Há algumas particularidades na transferência dos radionuclídeos para as plantas dentre elas: pH, troca de cátions, quantidade de argila e matéria orgânica que aumenta a absorção dos radionuclídeos pela raiz (FABIANA, 2012). Tem-se também que o uso de fertilizantes representam grande parte de radionuclídeos presentes na natureza, uma vez que sua aplicação é constante no solo e nas plantas, usados principalmente para aumentar a quantidade de nutrientes do solo e conseguir uma maior produtividade do mesmo (CARLOS et al., 2004).

A relação entre solo, água e fertilizantes gera uma cadeia de transferência que chega até os alimentos, fazendo com que alguns radionuclídeos regressem diretamente ao homem, dentre eles destacam-se urânio, potássio, bismuto e chumbo radioativo que são núcleos instáveis e pode-se atribuir-lhes à incidência de algumas doenças; por exemplo, a quantidade de urânio que os seres humanos ingerem através da água e alimentos varia em torno de 90 µg, os quais interagem com o fígado em 66% e com os rins em 8%. O ser humano consome diversos tipos de alimentos, sendo que a quantidade de urânio varia de acordo com o que se é consumida (GARCIA et al., 2006). Em relação aos órgãos de interação do urânio destacam-se os rins onde a toxicidade é maior, apesar dos ossos também terem bastante relevância (FONSECA, 2009).

Além do urânio temos também o elemento ^{40}K que é um isótopo radioativo. Com a emissão de uma partícula beta o ^{40}K decai para o radionuclídeo ^{40}Ca estável, e que é facilmente encontrado na natureza, principalmente no solo. A contaminação no ser humano ocorre principalmente através dos alimentos e alguns possuem maior possibilidade de se encontrar o elemento ^{40}K , como por exemplo bananas e kiwis. Em alguns países como Sérvia e Kósovo foram demonstrados níveis elevados de ^{40}K e há relação com cânceres de tumores múltiplos. Sendo 98% de todo o ^{40}K presente em nosso organismo estão nas células onde são capazes de alterar o DNA (GONZÁLEZ, E. et al. 2012).

Outro radionuclídeo de interesse é o elemento ^{210}Bi que decai para o elemento ^{210}Pb na cadeia radioativa; o ^{210}Bi ao entrar no organismo do homem interage com o sangue, e no sistema circulatório percorre todo o organismo; a maioria deste bismuto é excretado na urina e apenas uma pequena parte vai embora em semanas, sendo que a interação bismuto plasma se distribui em 35% na urina, 7% no trato intestinal, 5% no fígado e 18% para os outros

tecidos. Como os radionuclídeos naturais podem variar de ambiente nota-se que os teores de radiação no corpo humano variam de lugar e hábitos alimentares de cada região.

Ao final da cadeia de radionuclídeos temos o chumbo - 210 (^{210}Pb) que tem meia-vida de 22,3 anos. A partir do radionuclídeo rádio - 222 (^{222}Ra) o mesmo se desintegra e gera o ^{210}Pb que é sentido no meio ambiente terrestre e aquático, onde é depositado naturalmente ou pela ação da chuva (BUENO, L., 1999).

Neste contexto de radionuclídeos e como estes influenciam nosso organismo, propôs-se um estudo analítico de alguns alimentos, água, solo e fertilizante, relacionando-os com seus respectivos radionuclídeos a fim de determinar a dose efetiva que se consome desses radionuclídeos e correlacionar com algumas doenças.

1.3 OBJETIVOS

1.3.3 Objetivo geral

Determinação dos índices de radiação natural e artificial em amostras de solo, água, alimentos e fertilizante na região da Colônia Agrícola do Catetinho (CAUB I), Distrito Federal.

1.3.2 Objetivos específicos

- Obter um mapa de ocorrência dos elementos radioativos na região da CAUB I.
- Determinar se há ocorrência de radionuclídeos antropogênicos no meio ambiente dessa região.
- Determinar se há ocorrência de material radioativo aumentado devido ao uso de fertilizantes na água, no solo e em plantas da região denominada Colônia Agrícola do Catetinho.
- Determinar se há ocorrência de radionuclídeos aumentados devido ao uso de fertilizante no solo, água (indireto) e em alimentos produzidos na região da CAUB I.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RADIAÇÃO AMBIENTAL

A radiação natural a que estamos sujeitos é proveniente de átomos radioativos do ambiente, oriundas das rochas e solo, dos radionuclídeos do ar e da exposição da radiação do cosmos. Faz parte do cotidiano, sendo encontrada nos alimentos, na água e no organismo. Henri Becquerel (1852-1908) foi o primeiro cientista a tratar da radiação natural obtida através de sais de urânio.

2.2 ORIGEM DOS RADIONUCLÍDEOS NATURAIS

A massa original da Terra é composta por radionuclídeos primordiais desde seu surgimento, há aproximadamente 4,8 bilhões de anos, esses radionuclídeos vêm decaindo e somente os que se originaram deles ainda estão na natureza, sendo um deles o ^{238}U com meia-vida de 4,5 bilhões de anos (SCHEIBEL, 2006).

A partir desses radionuclídeos primordiais pode-se dizer que as estrelas sintetizaram os elementos químicos em nosso Universo. Inicialmente compostas apenas de hidrogênio essas estrelas através de reações nucleares de fusão, e contrações gravitacionais de suas massas desenvolvem os processos de síntese. Nas explosões das supernovas ocorre a produção de uma larga escala dos elementos químicos (TAUHATA; PRINZIO; PRINZIO, 2003).

Os elementos químicos durante sua formação nas supernovas são instáveis, entretanto alguns são estáveis devido a suas meia-vidas serem curtas. Os elementos ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e os radionuclídeos gerados pelos seus decaimentos contribuíram para a radioatividade natural da crosta terrestre (TAUHATA, et al, 2003).

Existe uma fração de radionuclídeos que através dos raios cósmicos interagem com átomos da atmosfera e são chamados de radionuclídeos cosmogênicos; as formas de produção desses raios cósmicos, dentre outras, são processos no sol e nas estrelas, explosões de supernovas e núcleos de galáxias ativas. A radiação cósmica é em geral formada por 79% de prótons, e 15% por partícula alfa de hélio (KATHNEN, 1998; FEYNMAN, 2005). Nossa atmosfera foi constituída a fim de impedir que a radiação direta das partículas nos atinja; a absorção das interações de partículas de alta energia na atmosfera recebe o nome de

“chuveiro atmosférico” onde partículas secundárias tem energia suficiente para interagir em outra série.

Na medida em que a atmosfera se torna mais densa o processo de multiplicação das partículas continua e quando a energia é baixa começa o processo de perda onde os raios cósmicos não conseguem chegar até a superfície, pois falta energia. Entretanto, na produção dos chuueiros atmosféricos há o aparecimento de partículas, dentre elas os múons que são instáveis e só interagem com a matéria por colisão perdendo energia (BIRAL, 2002).

Como os raios cósmicos bombardeiam a atmosfera um dos fenômenos que ocorre é a produção dos radionuclídeos cosmogênicos, dentre eles o ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na e ^{85}Kr , com um pequeno percentual radioativo, uma vez que quase todos os seres vivos possuem carbono e hidrogênio (TAUHATA; PRINZIO; 2003).

2.2.1 Potássio

O Potássio na tabela periódica tem o símbolo K, tem boa interação com água e oxidação na presença do ar. Já o potássio - 40 (^{40}K) quando decai é um emissor de partículas beta e radiação gama, constituído por um isótopo radioativo de afluência natural com meia-vida de um milhão de anos. O ^{40}K que é radioativo constitui cerca de 0,0117% do total de potássio, sendo encontrado em todos os tecidos e órgãos dos seres humanos.

O ^{40}K tem dois modos de decaimento: decaimento β - 89% de probabilidade, com produção do ^{40}Ca e, com 11% de probabilidade de decair por captura eletrônica para o ^{40}Ar . A Figura 01 demonstra o esquema de decaimento do Potássio-40.

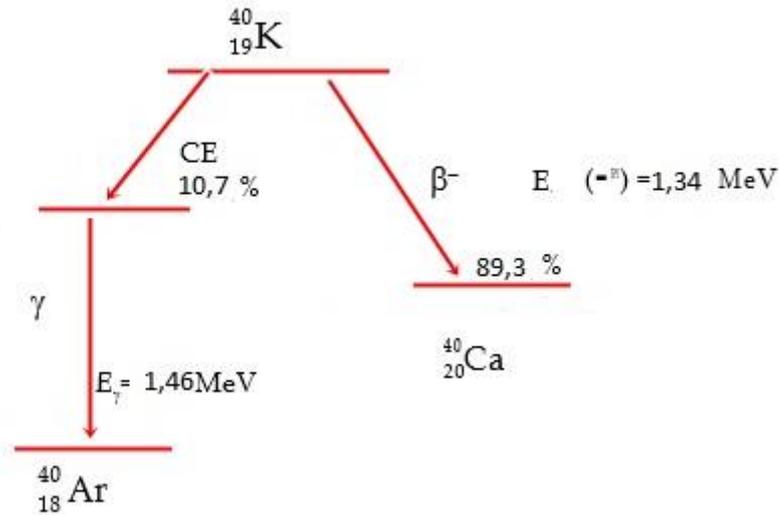


Figura 1- Esquema de decaimento radioativo do isótopo ^{40}K (UMISED, 2007)

Pode-se considerar algumas formas de contaminação do ^{40}K , sendo uma delas a mistura com argila, podendo trocar de lugar com outros íons; sendo assim as plantas absorvem o potássio, com extrema importância para a fotossíntese para a obtenção de energia. E nos seres humanos o ^{40}K corresponde a uma dose anual de 0,17 mSv para adultos e de 0,19 mSv para crianças (UNSCEAR, 2000).

2.2.2 Urânio

O urânio (U) elemento natural e comum em comparação com o tório é quatro vezes menos abundante. O urânio tem três isótopos radioativos de massa 234, 235 e 238 que decaem até se estabilizarem no chumbo. Sua estrutura cristalina é ortorrômbica. O U possui dois estados de valência U^{6+} e U^{4+} . A forma mais reduzida, U^{4+} , está comumente contida em minerais insolúveis, ao oposto da forma mais oxidada, U^{6+} (VASCONCELOS, 2010).

O urânio por ser um radionuclídeo natural está presente nas rochas e minerais, com isso o solo também é bem propenso a ter esses radionuclídeos, com maior facilidade de penetrar nas plantas e acometer o homem. Também pode passar para o ser humano através da água, alimento e ar, variando a quantidade de urânio absorvida por dia em $0,07 \mu\text{g}$ a $1,1 \mu\text{g}$. Apenas 2% do urânio absorvido no corpo se aloja nos tecidos.

2.3 CADEIAS RADIOATIVAS

O comportamento químico do radionuclídeo pai é diferente do radionuclídeo filho, ambos são radioativos, portanto cada radionuclídeo descende das quatro séries dos elementos, exceto alguns de origem cosmogênica como o elemento ^{40}K (SCHEIBEL, 2006).

Em relação às séries que existem na natureza podemos destacar a do elemento ^{238}U , cuja afilência natural é de 99,27%, a do ^{235}U com afilência natural de 0,7% e o elemento ^{232}Th cuja afilência natural chega a 100%. Contudo, todas as séries iniciadas pelo isótopo do urânio ou tório são terminadas em um isótopo estável do chumbo. Podem ser vistas na tabela 1 as séries iniciais e finais dos elementos radioativos.

Tabela 1: Produtos iniciais e finais das séries radioativas (BURCHAM, 1974)

Nome da série	Número de massa	Inicial	Período	Final
Tório	4n	^{232}Th	$1,4 \times 10^{10}$	^{208}Pb
Netúnio	4n+1	^{237}Np	$0,0002 \times 10^{10}$	^{209}Bi
Urânio	4n+2	^{238}U	$0,45 \times 10^{10}$	^{206}Pb
Actínio	4n+3	^{235}U	$0,072 \times 10^{10}$	^{207}Pb

A partir dos radionuclídeos que descendem do elemento ^{238}U destaca-se o ^{226}Ra . Sua meia-vida é de 1600 anos e ao emitir partículas alfa produz o ^{222}Rn , sua meia-vida é de 3,82 dias, seu decaimento origina os radionuclídeos ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po , ambos com meias-vidas curtas. O ^{222}Ra é um gás inerte que muitas vezes é encontrado em residências, cavernas, minas, etc., sendo responsável por 50% de dose efetiva oriunda da radiação natural (MAGALHÃES, 2003). As Figuras 02, 03 e 04 apresentam as séries de decaimento do ^{238}U ; ^{235}U e ^{232}Th respectivamente.

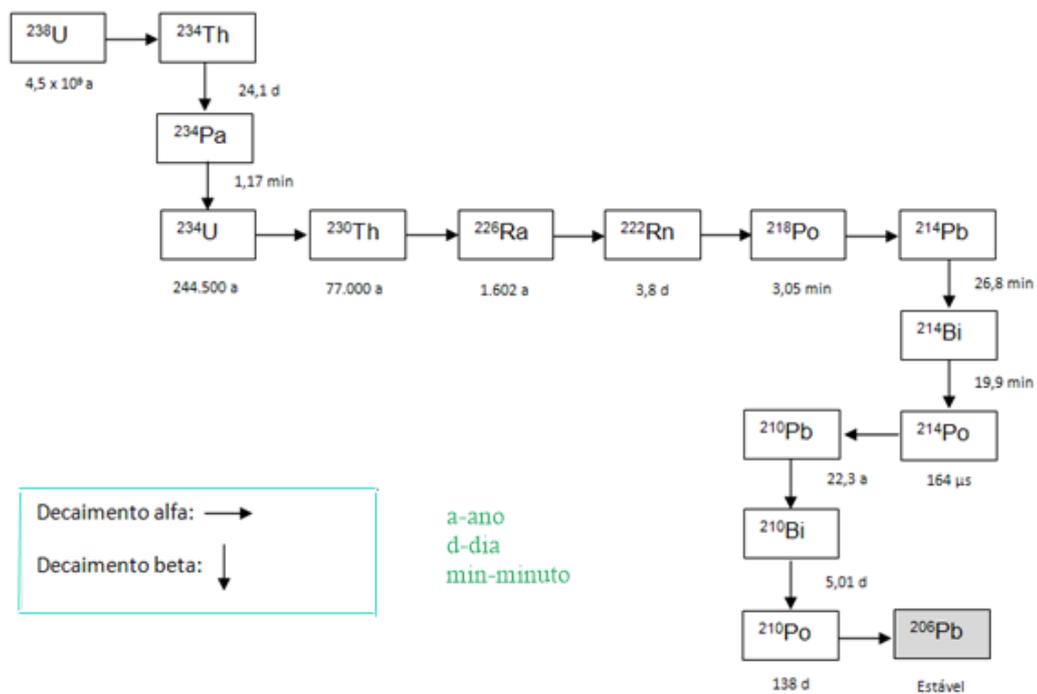


Figura 2 - Decaimento radioativo da série do ²³⁸U (EGGEBERT-SEELMANN et al., 1974)

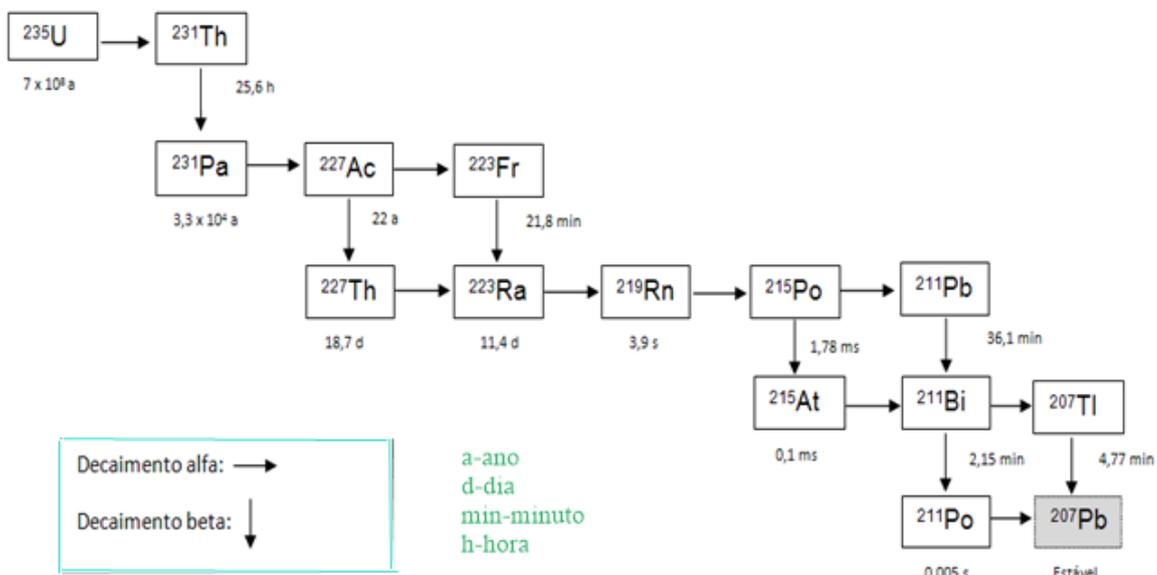


Figura 3 - Decaimento radioativo da série do ²³⁵U (EGGEBERT-SEELMANN et al., 1974)

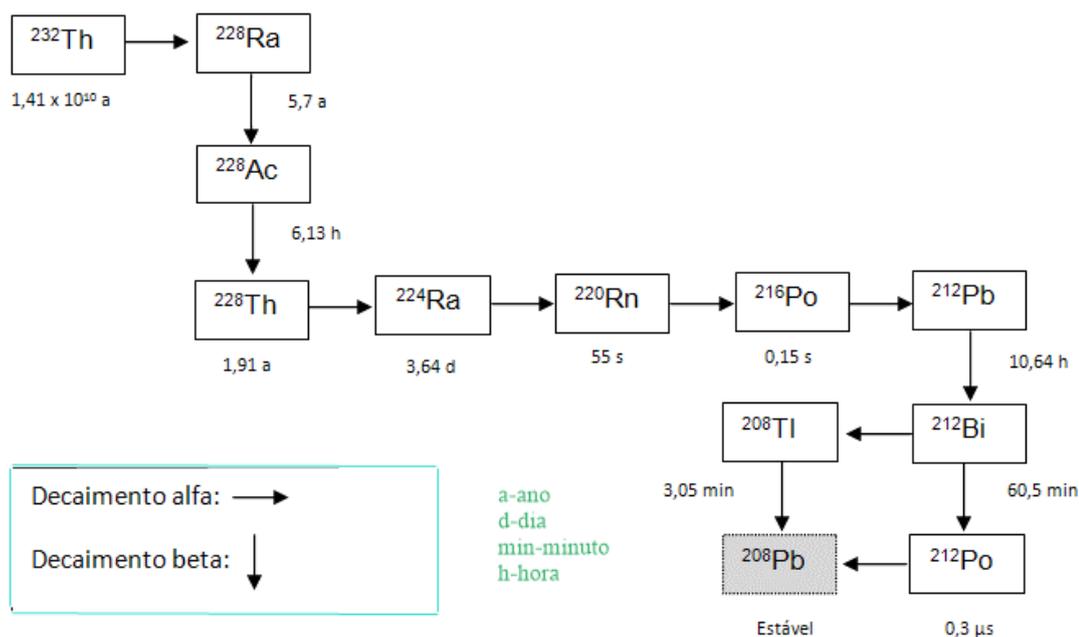


Figura 4 - Decaimento radioativo da série do ^{232}Th (EGGEBERT-SEELMANN et al., 1974)

Existem diversos radionuclídeos cosmogênicos espalhados em pequenas quantidades na atmosfera, sendo um dos mais prejudiciais o radônio, que participa da cadeia do ^{238}U . O radônio não se acumula no aparelho respiratório: Ele é inalado e expelido rapidamente e apenas uma pequena fração vai para os alvéolos pulmonares através de sangue e uma outra se aloja no corpo. O risco do radônio deve-se aos seus radionuclídeos associados tais como: polônio, bismuto e chumbo acarretando uma série de complicações no organismo humano (BOSTICK; CHOROVER, 2002).

O elemento ^{40}K é o mais significativo radionuclídeo dos vinte e quatro primordiais que existem, contudo apenas o ^{40}K radioativo possui uma meia-vida de $1,28 \times 10^9$ anos, e isotópica abundância de 0,0118% (KATHREN, 1998).

2.4 LOCALIZAÇÃO DOS RADIONUCLÍDEOS NA NATUREZA

Na nossa atmosfera estão presentes os radionuclídeos que podem sofrer decaimento em trânsito ou são depositados na superfície da Terra. Já no solo eles estão presentes na camada

superficial e espalham-se no primeiro centímetro do solo e a falta de planagem do solo e suas erosões reduz a radiação (UNESCAR, 2000) (EISENBUD,1997).

Sabe-se que o urânio e o tório encontram-se presentes no solo, nas rochas e minérios estando presentes os radionuclídeos das famílias radioativas, pois ambos sofrem decaimento. Alguns elementos radioativos como o radônio e o torônio, que são gasosos, geralmente estão presentes na construção civil, como cerâmica, tijolo, granito, etc., sendo assim serão emanados. Todos os seres vivos respiram elementos radioativos, e como o radônio e o torônio possuem meia-vida curta, a maioria dos radionuclídeos inalados ou ingeridos decai no organismo e irradia nossos órgãos e tecidos (TAUHATA; PRINZIO; PRINZIO, 2003).

Na série de decaimento radioativo do elemento Rádio (^{222}Ra) ocorre a emissão de partícula alfa e a formação do elemento radônio (^{222}Rn). Trata-se de uma série importante de decaimento radioativo em que o radônio encontra-se na superfície do solo e parte do elemento Rádio é liberado para atmosfera. Contrariamente ao elemento Urânio, o elemento Rádio é solúvel no solo, estando sujeito ao processo de lixiviação onde ocorre formação de compostos que são disponíveis para flora e fauna (KATHREN, 1998).

2.5 RADIOATIVIDADE ARTIFICIAL

Em 1934 Curie e Joliot, ao demonstrarem que transformações nucleares são radioativas, caracterizaram uma nova etapa na física nuclear. Com o bombardeamento de partículas sobre alguns núcleos de elementos leves, reações de prótons, nêutrons e fótons, demonstrou-se o surgimento de elementos radioativos. Pode-se definir que os radionuclídeos artificiais são definidos pela radiação que eles emitem e por sua meia-vida similar aos radionuclídeos naturais.

Dentro do contexto de radiação, as bombas nucleares ao explodirem liberam grande quantidade de calor e radiação, uma vez que para sua máxima eficiência são necessários testes de comprovação de sua eficácia; com isso há o surgimento de elementos radioativos artificiais. Os vazamentos nucleares também são grandes causadores dessas formações e são encontrados na Terra devido ao “fallout”. Quando explosões de armas nucleares ocorrem com menos de um megaton, há o surgimento de uma nuvem para a troposfera e fragmentos

maiores são puxados por meio da gravidade para a Terra provocando o “fallout” (GLASSTONE; DOLAN, 1977).

Já em explosões nucleares acima de um megaton há o surgimento de nuvens que atingem a estratosfera e ventos de leste a oeste. Os fragmentos causados pela explosão ficam bastante tempo na estratosfera e dali são transferidos para a troposfera e voltam para a atmosfera devido a força gravitacional e ficam acumulados na natureza.

A presença dos elementos radioativos na biosfera advém da deposição dos elementos na superfície da Terra, através do qual ocorre a explosão proveniente da radiação nuclear, podendo atingir os alimentos que são consumidos pelo homem e animais. Os herbívoros, por exemplo, são bem sujeitos a contaminação (BITELLI, 1982).

2.6 RADIONUCLÍDEOS EM ALIMENTOS

Os traços radioativos que existem no ambiente e nos alimentos fazem com que se possa analisar a quantidade de radiação a que a sociedade está exposta. O “fallout” é de extrema importância, pois os radionuclídeos se depositam nos alimentos através dele, incorporando aos nutrientes.

Considerando-se que em praticamente todas as plantações são usados fertilizantes, o uso indiscriminado de fertilizantes fosfatados pode gerar o aumento de radiação nos alimentos, as vezes até mais que o tolerável (FERNANDES *et al*, 2001), sendo capaz de ser agravado pela ocorrência do “fallout”. Fertilizantes fosfatados podem conter alguns radionuclídeos como os elementos ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K (MIRILEAN, 2001). A radioatividade presente nos alimentos é bastante variável por causa do fosfato. Devido ao fato de os fertilizantes serem longamente usados na produção de alimentos haverá uma redistribuição de urânio, tório e potássio, o que ocasiona a contaminação dos solos fertilizados até chegar à água.

Deve-se analisar que algumas situações específicas modificam a transferência dos radionuclídeos do solo para as plantas pelas raízes, dentre elas: argila, pH, e troca de cátions. Se o nível de argila for alto há uma maior ligação do Césio reduzindo a absorção pela raiz. Quando há o excesso de potássio ele dilui os íons do Césio (UNSCEAR, 2000).

Há várias maneiras da entrada dos radionuclídeos na cadeia alimentar: Dependendo do metabolismo e do organismo, concentrações diminuem ou aumentam. Algumas partes dos animais que não são consumidas estão fora desse ciclo de contaminação a partir de produtos animais, entretanto alguns ossos voltam à cadeia alimentar através da farinha.

Os efeitos do processamento dos alimentos com radionuclídeos se fazem necessários quando se trata da dose de radiação consumida principalmente em alimentos contaminados. Os fatores de retenção no processamento de alimentos, ou a fração de radionuclídeos nos alimentos após serem processados é bastante variável. Os alimentos secos aumentam suas concentrações comparadas a alimentos frescos (UNSCEAR, 2000).

Alguns radionuclídeos como os elementos ^{232}Th , ^{210}Pb , ^{238}U também são encontrados na mesa do homem pelo consumo de alimentos e água que contêm uma certa quantidade de radioisótopos em sua composição. A referência do homem para a radiação é de aproximadamente 100–125 $\mu\text{g/g}$ de urânio (ICRP, 2012; ICRP, 1976). O ^{238}U tem uma média de 5Bq, principalmente em alimentos, dentre eles os mariscos equivalem a um terço, 20% vegetais frescos e menos de 10% água potável (FISENNE *et al.*, 1987; UNSCEAR, 1988; NATIONS, 1988).

O potássio também está presente em alguns alimentos, dentre eles grãos (como feijão, soja e lentilha), algumas oleaginosas (como castanha, nozes e amêndoas) e algumas frutas em conserva (como damasco, figo, ameixas). Dentre as frutas pode ser encontrado na banana, melão, abacate, alguns tubérculos (como batata doce e mandioca) e raízes, como a cenoura (BIRAL, 2002).

O elemento ^{137}Cs é um isótopo artificial e na poeira radioativa de explosões nucleares ele é carregado pelo vento para a estratosfera e a troposfera, acumulando-se nos alimentos dos homens e animais, sendo 30% pelo leite; 25% grãos, 20% carne e 10% vegetais.

2.7 RADIAÇÃO IONIZANTE PROVENIENTE DOS RADIONUCLÍDEOS

Em 1905, Albert Einstein verificou que a massa pode ser convertida em energia, sob forma de luz, calor e radiação ionizante. Fermi em 1942 testou a teoria de Einstein e obteve êxito ao operar a primeira pilha atômica em um laboratório; com os resultados de cientistas de

todo o mundo, as radiações ionizantes se tornaram de extrema importância para o desenvolvimento tecnológico que a sociedade vivencia a cada dia (PANAMERICANA, 1959).

Neste contexto, dentro do núcleo atômico dos elementos radioativos, são expelidas radiações ionizantes, dentre elas partículas alfa (α), beta (β), radiação gama (γ) e nêutrons (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

As partículas alfa consistem na estabilização de um núcleo que por exceder energia, emite partículas positivas, sendo dois prótons e dois nêutrons; elas saem do núcleo com velocidade de 20000km/s onde o meio as absorve com facilidade. As partículas beta ocorrem quando há um excesso no núcleo de nêutrons em relação aos prótons, emitindo uma partícula negativa. Radiação gama consiste na desexcitação nuclear onde há emissão de uma onda eletromagnética, sendo que os raios gama e os nêutrons não possuem carga (AQUINO, 2012).

A radiação gama consiste em emitir núcleos atômicos de elementos radioativos tanto naturais quanto artificiais; essa radiação eletromagnética possui um comprimento de onda bem curto, o que faz com que seu poder de penetração seja altíssimo. Possui cerca de 5MeV em substâncias radioativas naturais e cerca de 20MeV em reações nucleares artificiais, caracterizando uma fácil ionização; além disso provoca algumas reações nucleares, e em alguns casos surgem pares de elétrons-pósitrons onde há formação de partículas elementares. A Figura 05 mostra a penetração das radiações em materiais diferentes.

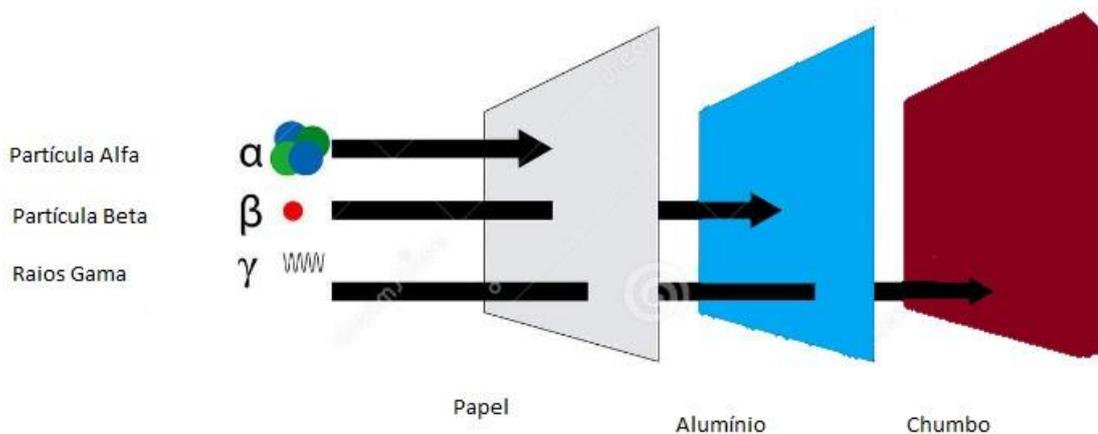


Figura 5 - Representação da penetração das radiações ionizantes < Acesso em 25-03-2017 às 22:15 <https://www.dreamstime.com/stock-illustration-radioactivity-penetration-range-alpha-beta-gamma-radiati-radiation-image44802330>>

2.8 DECAIMENTO RADIOATIVO

O decaimento radioativo ocorre quando um núcleo de átomo instável emite partículas alfa, beta ou radiação gama e perde energia, podendo o núcleo mudar para um novo núcleo ou até mesmo sofrer mudança do estado energético.

No decaimento radioativo, pode-se afirmar que as leis que governam o universo são estáticas. Considera-se que, embora seja impossível prever quais núcleos irão decair, em uma amostra que contém N núcleos radioativos, a taxa de decaimento obedecerá a equação:

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

Onde λ é a constante de decaimento e cada radionuclídeo possui um valor diferente para ela, sendo a unidade de λ no sistema internacional (SI) e o inverso do segundo (s^{-1}). Para determinar N em função do tempo t , usamos a separação de variáveis, onde:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad (2)$$

Pode-se fazer a integração, obtendo,

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^t dt, \quad (3)$$

Ou apenas usar a seguinte notação,

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - t_0), \quad (4)$$

Onde N_0 é o número de núcleos radioativos, e fazendo $t_0 = 0$ onde, transforma-se a diferença de logaritmos em uma fração, obtém:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t, \quad (5)$$

Tomando a exponencial de ambos os membros, tem-se:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

Ou a Equação 7 (decaimento radioativo)

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (7)$$

A unidade de atividade dos radionuclídeos é o Bq (Becquerel) sendo uma unidade do SI, entretanto muitas vezes é trocada por Ci (Currie) que equivale à quantidade de material radioativo que se fragmenta com a mesma velocidade de um grama de rádio puro. Sendo assim:

- ✓ 1 Bq = 1 desintegração por segundo (dps)
- ✓ 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo (dps) = $3,7 \times 10^{10}$ Bq

A mais utilizada na prática corresponde à atividade por unidade de volume ou massa (Bq/kg ou Bq/L) (HALLIDAY, 2009).

2.9 EQUILÍBRIO RADIOATIVO

Na série natural o denominado radionuclídeo “pai” sofre uma mudança e dá origem aos radionuclídeos “filhos” onde esse fato é puramente probabilístico (AQUINO, 2012). Devido à meia-vida do radionuclídeo pai ser maior que a do filho obtém-se o equilíbrio secular ou equilíbrio transitório.

Quando o equilíbrio radioativo é atingido pode-se considerar que o radionuclídeo pai e o radionuclídeo filho possuem a mesma concentração de atividade. Na série do ^{238}U , por exemplo, a atividade do ^{214}Ra pode ser medida a partir da atividade do ^{214}Pb e ^{214}Bi (AQUINO, 2010).

2.10 EQUILÍBRIO SECULAR

Para os decaimentos subsequentes de pai e filho, tem-se o equilíbrio transiente e equilíbrio secular, que se fundamentam da meia-vida dos núclídeos envolvidos. O equilíbrio secular ocorre quando a meia-vida do pai é muito maior que a do filho.

Para, $\lambda_2 - \lambda_1 \cong \lambda_2 t \exp(-\lambda_1 t) \cong 1$, sabendo que a atividade é dada por $\lambda_2 N_2(t)$.

$$A_2(t) = A_0 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (8)$$

Onde $A_0 = \lambda_1 N_0$

Então a Equação 8 se reduz;

$$A_2 = A_0 (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (9)$$

Quando $t \gg T_1/T_2$,

$$A_2(t) = A_1(t) \quad (10)$$

Para quando se atinge o equilíbrio secular.

2.11 EQUILÍBRIOTRANSIENTE

Temos que para o equilíbrio transiente ocorrer a meia vida do pai deve ser maior que a meia vida do filho, com isso após um período relativamente grande, igual ou maior que dez meias-vidas do elemento filho, o fator $\exp(-\lambda_2 t)$ da Equação 11 ficará desprezível quando comparado a $\exp(-\lambda_1 t)$. Para tanto $A_2(t_0) = 0$,

$$A_2(t) = A_0 e^{-\lambda_1 t} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = A_1(t) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (11)$$

Quando as condições do equilíbrio transiente são satisfeitas, os núcleos pai e filho mantêm uma proporção constante decretada por suas constantes de desintegração,

$$\frac{A_1(t)}{A_2(t)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (12)$$

2.12 RADIONUCLÍDEOS E SEUS EFEITOS NO ORGANISMO HUMANO

Para os radionuclídeos presentes no organismo humano pode ser descrito sob uma forma de queda exponencial com o passar do tempo, devido ao decaimento radioativo que os radionuclídeos estão sujeitos e pelo processo de excreção nos seres humanos. Sendo assim, o intervalo de tempo em que um material radioativo decai pela metade no corpo humano é chamado de tempo de meia-vida efetiva ($T_{1/2eff}$), e pode ser compreendido pela meia-vida física ($T_{1/2fis}$) e meia-vida biológica ($T_{1/2bio}$) onde verifica-se a permanência dos átomos conforme a Equação 13.

$$\frac{1}{T_{1/2eff}} = \frac{1}{T_{1/2fis}} + \frac{1}{T_{1/2bio}}. \quad (13)$$

Quando o homem ingere alimentos contaminados ele está exposto internamente, onde os radionuclídeos liberados no ambiente afetam diretamente o meio ambiente. Quando há o transporte dos radionuclídeos no ambiente, por meio da cadeia alimentar, se faz necessário considerar as concentrações dos radionuclídeos nos alimentos e a concentração que se encontra no ambiente (NG 1982).

Há também alguns metais alcalinos terrosos, como por exemplo, o Ba, Sr, Ra, que são semelhantes quimicamente com o cálcio, sendo depositados no tecido ósseo, podendo ficar no organismo por um tempo elevado. Pode-se dizer que na natureza não são muito

abundantes, sendo encontrados em pequenas concentrações. Através de alimentos e água contaminados vão ao encontro do organismo humano. Uma pequena fração de atividade é depositada nos ossos, entretanto uma pequena quantidade migra para os ossos e transfere-se para o plasma de forma lenta, sendo assim a meia-vida efetiva associada aos ossos demora dezenas de anos (BIRAL, 2002).

Na Tabela 2 é possível observar a meia-vida física efetiva para os radionuclídeos. A meia-vida efetiva nos fornece a informação do tempo de retenção do radionuclídeo no organismo.

Tabela 2: Tempo de meia-vida dos radionuclídeos

Nuclídeo	Meia-vida física	Meia-vida efetiva	Fonte
^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$ a	30 d	ICRP, 1978 (2)
^{226}Ra	$1,60 \cdot 10^3$ a	No sangue: 29% - 5 d 11% - 60 d 4% - 700 d 2% - 5000 d 54% - excretado prontamente No tecido ósseo: 16000 d	ICRP, 1989
^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$ a	Ossos: 20% - 20 d 2,3% - 5000 d Rins: 12% - 6 d 0,052% - 1500 d Corpo todo: 12% - 6 d 0,032% - 1500 d Fração restante – excretada prontamente	ICRP, 1978 (1)
^{232}Th	$1,40 \cdot 10^{10}$ a	Se administrado por via intravenosa: Ossos: 70% - 8000 d Fígado: 4% - 700 d Outros órgãos: 16% - 700 d 10% restantes – excretado prontamente	ICRP, 1994
^{137}Cs	30,0 a	10% - 2 d	ICRP, 1978 (1)

Alguns radionuclídeos cosmogênicos, como o ^3H (Trítio) e o ^{14}C (Carbono 14) estão dispersos na atmosfera. Porém em relação à inalação não se compara, pois a ingestão é bem mais prejudicial (UNSCEAR, 2000).

2.13 INTERAÇÃO RADIAÇÃO X MATÉRIA

2.13.1 Efeito Compton

O efeito Compton é definido como a colisão elástica entre um raio gama, um fóton e um elétron livre. O fóton que incide tem energia $E = h\nu$ (a energia E é igual a constante de Planck h vezes a frequência ν) e choca-se com um elétron (MONTANHEIRO, 1977).

Quando o espalhamento Compton acontece o que ocorre é uma reciprocidade do fóton incidente e o elétron do material que se está estudando. Acontece que o espalhamento Compton comanda a interação quando o mesmo acontece na faixa do espectro de raios gama.

A Figura 6 demonstra o efeito Compton onde a explicação mais usual se dá entre o fóton incidente e o elétron. O elétron recebe parte da energia do fóton, uma vez que esse elétron está supostamente em repouso, quando isso ocorre o fóton é espalhado com um ângulo θ , porém todos os ângulos de espalhamento são prováveis.

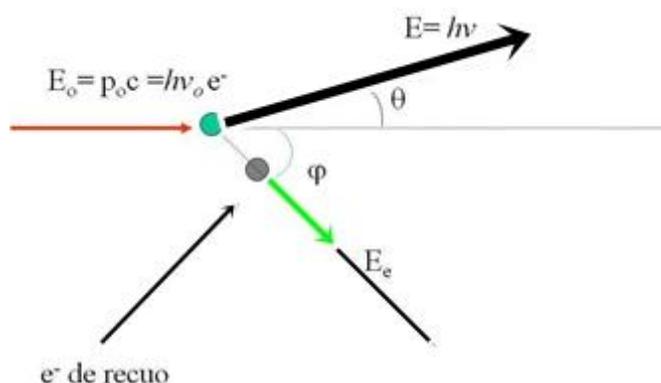


Figura 6 – Representação esquemática para o efeito Compton (KNOLL; WILEY, 2000).

A equação que correlaciona a energia transferida entre o ângulo de espalhamento pode ser obtida através da conservação da energia e momento,

$$0 = p \sin \theta - p_e \sin \phi \quad (14)$$

Como o elétron está inicialmente em repouso, a sua energia total é $m_0 c^2$. Após o espalhamento, o elétron adquire momento e de acordo com a relatividade especial, sua energia é dada por,

$$E^2 = p_e^2 + m_0 c^2, \quad (15)$$

aplicando a conservação da energia:

$$E_0 + m_0 c^2 = E + E. \quad (16)$$

Onde $m_0 c^2$ é a energia de repouso do elétron (511 keV). Para ângulos pequenos, a energia transferida também é muito pequena.

2.13. 2 Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico pode ser definido quando a superfície de um metal é atingida por um raio luminoso de comprimento de onda bastante pequeno. A luz excita os elétrons e eles são emitidos pelo metal e esse fenômeno não pode ser explicado pela física clássica. A Figura 7 demonstra o experimento do efeito fotoelétrico.

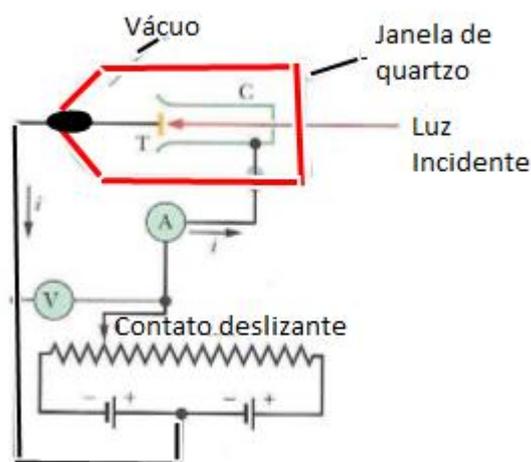


Figura 7 – Esquema do efeito fotoelétrico (WALKER, 2011).

O experimento detalha uma luz de frequência f que incide em um alvo T , onde ejetam os elétrons, com isso gera uma diferença de potencial que é mantida entre o alvo T e o coletor C que é usualmente empregado para guardar os elétrons ou como são chamados, fotoelétrons. Uma corrente elétrica i é formada quando os elétrons são ejetados e são medidos pelo amperímetro A (WALKER, 2011).

Para o efeito fotoelétrico toda a energia $h\nu$ do fóton incidente é adquirida por um elétron orbital, ejetando-o com energia cinética de $T = h\nu - B$, onde B é a energia de ligação que une o elétron ao orbital. O fotoelétron pode ser expelido ou pode ser reabsorvido uma vez que seu alcance no material é pequeno. Quando a energia $h\nu$ do fóton for pequena o suficiente para se desprezar os efeitos relativísticos evitando assim o uso da equação de Dirac, onde o cálculo não é trivial, tornando-se grande suficiente para que a energia de ligação B dos elétrons (camada K) possa ser descartada.

Se o elétron estiver preso a um átomo pode-se dizer que o efeito fotoelétrico irá acontecer, nesse caso um fóton de energia $E\gamma$ incide sobre um átomo onde é absorvido. Um elétron ejetado do átomo é proveniente das camadas K e L e possui uma energia dada pela Equação 17.

$$T_p = E_\gamma - B_e; \quad (17)$$

B_e é a energia de ligação do elétron (MONTANHEIRO, 1977).

2.13.3 Produção de pares

A produção de pares pode ser definida como o processo de transformação de um fóton em um par de elétron-pósitron. Isso se dá pela relação de conversão de massa em energia dada pela equação de Einstein $E = mc^2$, uma vez que o fóton não possui massa e o elétron e o pósitron possuem. Esse encadeamento é o contrário da aniquilação de pósitrons o que difere é que na produção de pares a presença de um material é indispensável para a conservação de *momentum*.

A produção de pares é o processo mais significativo para altas energias e ocorre com a interação do campo de força nuclear com o fóton; esta desaparece totalmente onde a energia é transformada em matéria equivalente a famosa equação de Einstein. Para energias superiores a 1,022 MeV ($E = mc^2$). A Figura 08 representa a produção de pares. A energia 1,022 MeV equivale a massa de repouso onde se cria o par elétron-pósitron. Considerando esses fatos o processo de produção de pares só ocorre se forem usados feixes de radiação com fótons, onde a energia é maior que duas vezes a massa de repouso do elétron $2m_0c^2$.

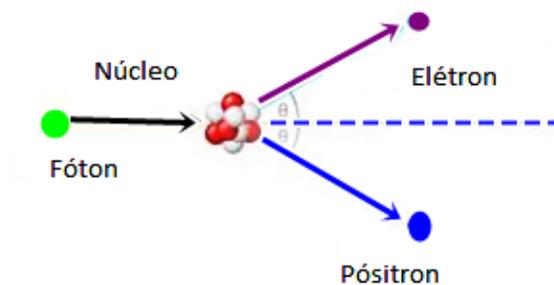


Figura 8 - Produção de um par de elétron-pósitron e aniquilação sucessiva deste último (KNOLL; WILEY, 2000).

O pósitron interage com o elétron ao final de sua jornada e produz dois quantas de radiação por aniquilação. Acontece que um ou dois fótons gerados nessa aniquilação podem

emergir do material, ou podem ser absorvidos tanto pelo efeito fotoelétrico quanto pelo efeito Compton (MONTANHEIRO, 1977).

3 INSTRUMENTAÇÃO

3.1 ESPECTROMETRIA GAMA

Com a espectrometria gama pode-se avaliar a radiação em amostras ambientais, geológicas e biológicas, onde os radionuclídeos que estão presentes nas amostras podem ser emitidos através dos raios gama, sendo a técnica suficiente, não havendo a necessidade de separações químicas (CASTRO, 2008).

A espectrometria gama calcula a partir do decaimento radioativo a energia de cada fóton de raio gama, onde se torna possível a identificação dos radionuclídeos que estão na amostra de interesse. A energia de cada fóton é discreta sendo característica de cada isótopo, facilitando assim sua identificação (CASTRO, 2008). Dessa forma a espectrometria gama se tornou um método experimental do qual a espectrometria nuclear faz uso continuamente.

Para tanto na espectrometria gama, quando um raio gama interage com um material, isso pode ser feito de três formas: Efeito Compton; Efeito fotoelétrico e Produção de pares. Sendo assim, para o cristal detector, a energia que os raios gama dissipam é feita por esses mecanismos e produzirá um pulso de voltagem de amplitude proporcional à energia que o cristal dissipou (KNOLL; WILEY, 2000).

3.2 DETECTOR DE GERMÂNIO HIPER-PURO (HPGE)

Alguns detectores semicondutores são muito requisitados na espectrometria gama, devido à alta resolução, onde a eficácia em distinguir energias próximas é bastante consistente; tais detectores são mais sensíveis, pois operam com componentes de melhor qualidade e temperaturas específicas.

Para o detector de Germânio o cristal de HPGe é mensurável à radiação gama. O cristal deverá modificar o fóton de radiação absorvida em um pulso de corrente simétrico à energia de desintegração. Após o fóton adentrar nessa barreira gera um pulso de condução reversa devido à energia que ele fornece.

No detector de germânio o tipo de cristal pode ser tipo-p ou tipo-N, de acordo com átomos aceitadores e doadores no cristal; estes cristais possuem várias apresentações, entre elas forma cilíndrica com um buraco no meio, no qual os cristais podem ter um maior comprimento; existem também os cristais na forma de disco. Para os tipos de detectores HPGe do tipo-p são chamados de GEM, e os de tipo-n são chamados de GMX, entretanto para o uso em laboratórios os detectores HPGe são os mais comuns.

Para a espectrometria gama têm-se os seguintes componentes acoplados e integrados:

- Detector de germânio (HPGe) vertical que opera com pré-amplificador acoplado com baixo ruído por também estar resfriado
- Fonte de alta tensão que alimenta o detector e aplica uma tensão de 0 – 5000V
- Amplificador que amplifica e gera um pulso de forma gaussiana com subida rápida vindo do pré-amplificador.
- Analisador multicanal (MCA), que adquire os dados e possui 4096 canais
- Blindagem para o detector, constituída de chumbo, com uma geometria adequada para acomodar a amostra.
- Microcomputador para instalação do MCA e do software para armazenamento dos dados.

A Figura 09 apresenta um diagrama de blocos de um sistema típico de espectrometria de raios gama sem a blindagem e a Figura 10 representa um equipamento de espectrometria gama.

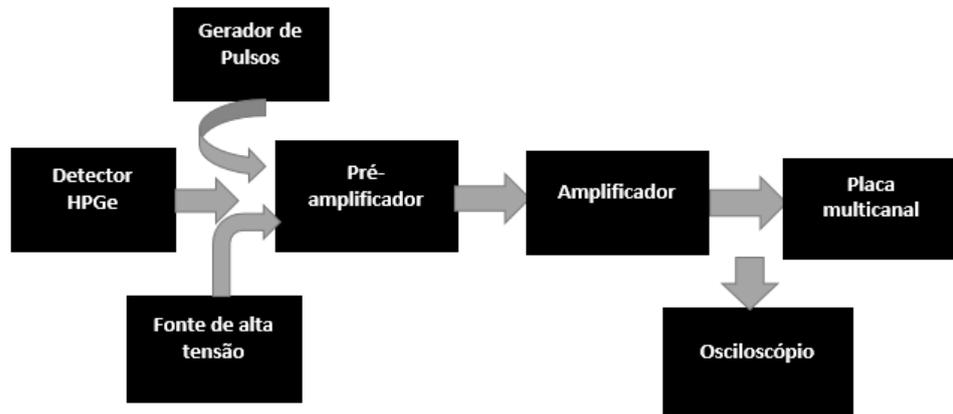


Figura 9 - Diagrama em blocos de um sistema típico de Espectrometria de raios Gama (Adaptado: VASCONCELOS, 2010).



Figura 10 - Equipamento Espectrometria Gama (GARCÊZ, 2016)

Dentre os detectores gama que operam com a ionização o semiconductor HPGe é o mais comum (KNOLL, 2010). As amostras emitem radiação gama que é absorvida pelos semicondutores, quando isso acontece um fenômeno chamado elétron lacuna é produzido. Com isso um campo elétrico é formado e estes são deslocados e um pulso é formado com amplitudes que dependem do tipo de interação que se discutiu anteriormente como o efeito fotoelétrico, espalhamento Compton ou produção de pares.

A ação da espectrometria gama consiste basicamente no recebimento pelo amplificador de um pulso de voltagem do pré-amplificador onde um pulso de saída na forma gaussiana é contado no MCA e este mede a altura do pulso, cuja origem é no detector. O MCA funciona como um conversor analógico-digital convertendo o pulso de voltagem em canais, cada um com uma faixa estreita de voltagem; esses pulsos vão sendo adquiridos e chegando no MCA que guarda na memória a contagem dos pulsos de acordo com sua altura, na qual a distribuição de altura do pulso é denominada de espectro (MONTANHEIRO, 1977).

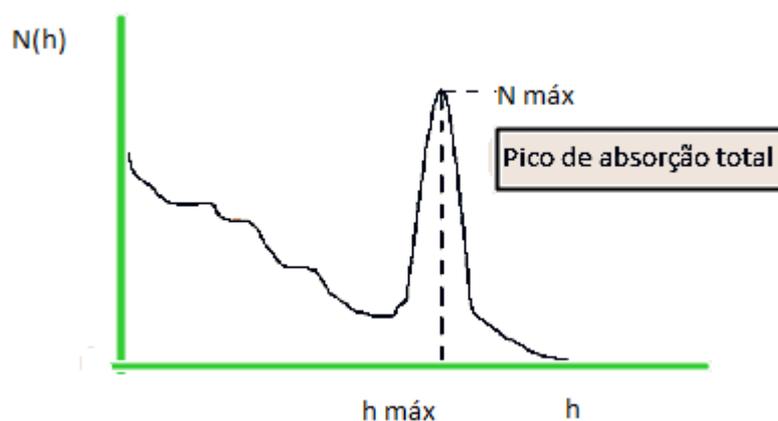


Figura 11 - Espectro de pulsos de radiação γ monoenergética (CARDOSO, 2014).

A Figura 11 ilustra o pico de detecção que ocorre na espectrometria gama. O espectro de pulsos que a radiação gama produz com energia E_γ apresenta alturas h que variam entre 0 e um valor $h_{máx}$, o que demonstra sua absorção total ($\Delta E = E_\gamma$). Com a natureza estática dos processos envolvidos na detecção, para os pulsos $\Delta E = E_\gamma$ não detém uma altura única $h_{máx}$ entretanto, há uma distribuição de alturas de forma aproximadamente gaussiana em torno de $h_{máx}$. Esses picos são denominados picos de absorção total.

3.3 EFICIÊNCIA DE DETECÇÃO

Após todas as interações físicas que acontecem entre a amostra e o equipamento de espectrometria gama o próximo passo é a aquisição do espectro. Os pulsos gerados pelo sistema geram valores que são processados pelo analisador multicanal. O sinal adquirido é

um histograma que conta a emissão gama detectada pelo sistema, com isso o detector HPGe consegue verificar todos os espectros gerados com 8192 canais (CANBERRA,2003).

Dizemos que a eficácia na detecção em espectrometria gama se dá na capacidade dos detectores em adquirir um pulso na saída para cada radiação que se comunica com o volume do detector. Existem alguns tipos de detecção secundárias, como por exemplo radiação eletromagnética e partículas sem carga. Essa eficiência pode ser classificada em três partes: eficiência absoluta, eficiência intrínseca e eficiência relativa.

A eficiência intrínseca é a razão entre o número de pulsos anotados pelo detector e o número de *quanta* de radiação que acomete o detector. A eficiência relativa é a razão da eficiência absoluta de um detector de cintilação. Para os detectores de HPGe a eficiência é cerca de 66% de acordo com o fabricante.

3.4 BLINDAGEM

Na espectrometria gama o fundo de radiação do sistema é correlacionado com a qualidade do espectro emitido pela mesma e com isso o sistema deve ter um fundo tão baixo quanto possível. Esta radiação se dá através de raios gama dos radionuclídeos de cadeias radioativas naturais e pelos radionuclídeos cosmogênicos. Analogamente a espectrometria de raios gama defronta-se com a questão de maximizar a taxa de cálculo do fotópico de interesse e a taxa de cálculo do fundo na região de energia do pico, ainda empregando detectores que diferenciem raios gama de energias próximas.

Algumas blindagens usadas em espectrometria gama são extremamente usuais, algumas são fabricadas com chumbo, entretanto usa-se também materiais com número atômico menor para que ocorra a blindagem que absorve os raios X. Com relação à espessura do material, isso irá depender da atenuação desejada para cada raio gama, para aplicações ambientais 10cm de chumbo são suficientes, onde atenua na faixa de 0 a 3 MeV de raios gama (HEIGHTS, 1956).

3.5 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

A geometria usada neste trabalho foi o béquer Marinelli, que consiste em frascos cilíndricos, o que faz com que esse tipo de geometria se acomode no detector, posicionando a amostra ao redor do mesmo, fazendo com que a detecção seja mais eficiente. Esses béqueres geralmente acomodam 1 litro e são totalmente preenchidos.

A radiação nas amostras é perfeitamente identificada a medida que os padrões de atividades conhecidas com dimensões, densidades e composição química são detectadas. Os béqueres Marinelli devem ser preenchidos com a amostra e colocados ao redor do detector de forma que a geometria consiga se adequar para uma leitura eficaz.



Figura 12 - Recipiente porta amostra do tipo Marinelli. (RODRIGUES; KASTNER, 2011)

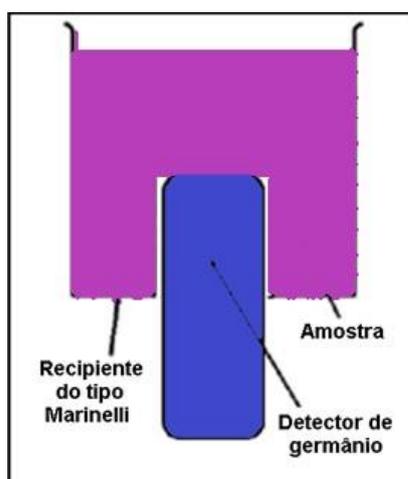


Figura 13 - Esquema de medida utilizando recipiente porta amostra do tipo Marinelli (RODRIGUES; KASTNER, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA AMOSTRADA

A área de interesse deste trabalho foi o CAUB I bairro localizado na região administrativa do Riacho fundo II, no Catetinho, Distrito Federal. A região foi escolhida por ser uma grande produtora e fornecedora de alimentos. Foram coletadas amostras em vários locais do Catetinho a fim de se obter uma quantidade representativa do local.

Para a região do CAUB I, inicializamos a coleta da seguinte forma: foi feita uma amostragem em grade de 3x3 metros para caracterizar a presença dos radionuclídeos a cada ponto de área amostrada; foi realizada uma varredura e uma área de 1 m² foi delimitada, com profundidade de 1 e 2 cm para o solo, utilizando espátula, trena e faca como instrumentos auxiliares de recolhimento do material.

4.1.1 Região Administrativa do Riacho Fundo II (CAUB I)

O território que compõe o Riacho Fundo II fazia parte de fazendas de Tamanduá, Taguatinga e Gama que pertenciam ao município de Luziânia, em Goiás; por volta de 1955 passaram a compor o Distrito Federal. Durante 19 anos, as terras do Riacho fundo II, foram destinadas a assentar famílias de baixa renda que viviam no setor de indústria. Algumas famílias chegaram ao Riacho Fundo II em 1986, enquanto o governo selecionava algumas famílias para participar do primeiro cinturão de produção de alimentos do DF.

Essa área foi destinada prioritariamente ao uso rural e a preservação ambiental. Em 1990 o Riacho Fundo II foi incluído no Plano de Uso e Ocupação do Solo do DF (POUSO), como Zona de Ocupação Restrita (ZOR) do Núcleo Bandeirante, juntamente com outras regiões, cujo objetivo era o uso rural, preservação e reflorestamento.

O CAUB I tem um pouco mais de 20 anos e ainda está em expansão, sendo destaque na área rural. Os agricultores do Combinado Agroubano aumentaram a produção ao longo dos anos, e nos últimos cinco anos cresceu 30%.

A Figura 14 apresenta a região de onde foram extraídas as amostras para determinação dos radionuclídeos do presente trabalho: A região se localiza no CAUB I, Distrito Federal, próximo ao Gama é uma área com 93,6 hectares, e os produtores rurais plantam milho, feijão, mandioca, hortaliças, uva e criam aves; os produtos dali originados abastecem bancas do Ceasa e feiras de regiões administrativas, dessa forma pode-se afirmar que há uma distribuição significativa em todo o Distrito Federal.

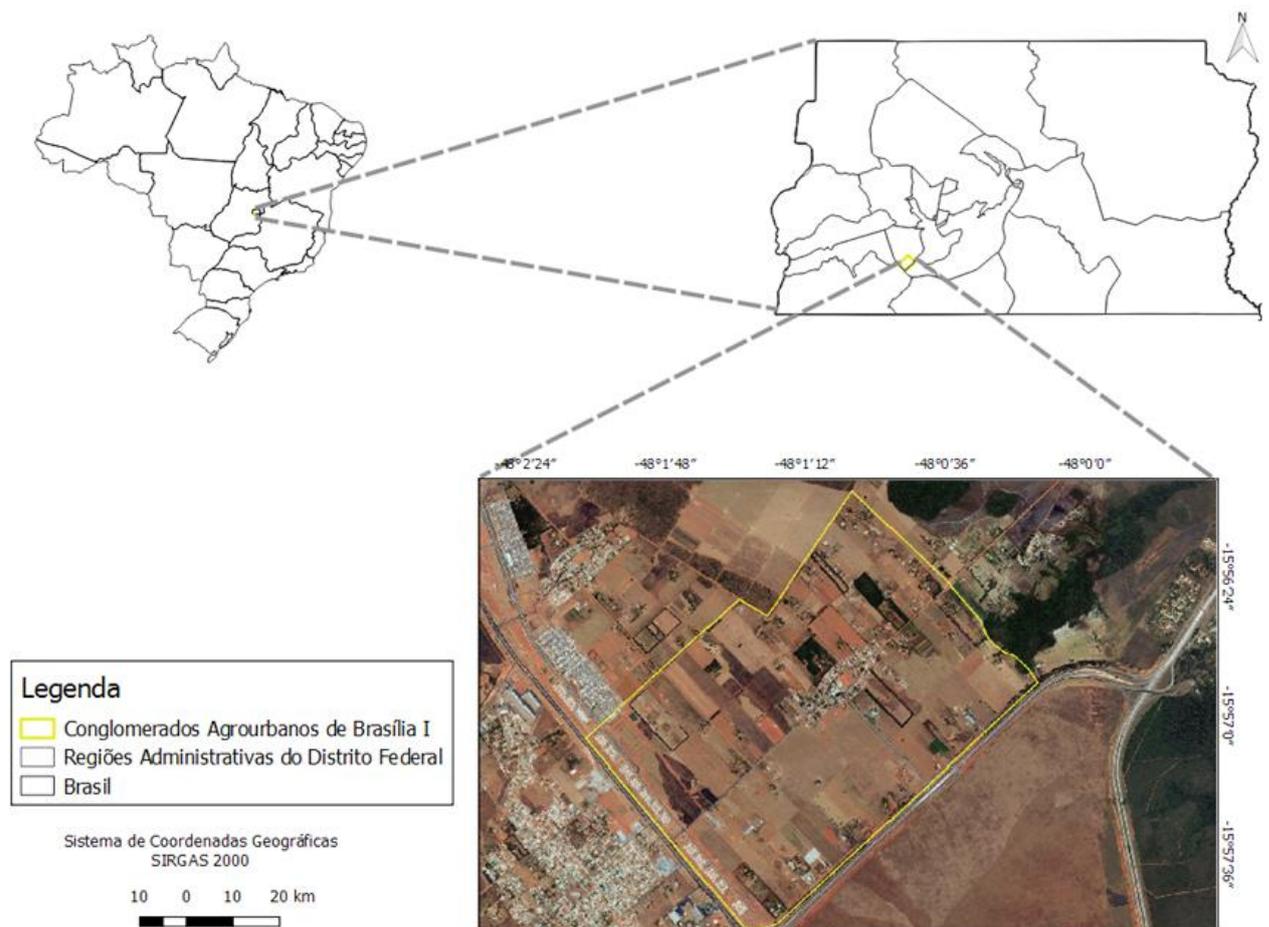


Figura 14: Mapa da região do CAUB I (Autoria própria)

4.2 PROCEDIMENTO DE COLETA E PREPARO EM LABORATÓRIO

4.2.1. - Procedimento para coleta de amostras

Nas amostras de solo foram coletadas cinco pontos na região do CAUB I. A profundidade da escolha da coleta foi até de 10 cm, com isso há uma amostragem para detecção de radionuclídeos naturais.

Para este trabalho, também adotou-se fertilizante químico usado para adubo do solo, dentre os quais não foram feitas distinções entre fosfatados, nitrogenados e potássicos. Os fertilizantes podem ser adotados tanto para o preparo do solo, através da mistura anterior à germinação, como aplicados ao redor das plantas, uma vez que elas já tenham crescido.

As amostras foram coletadas no período entre abril e junho de 2016. A relação das amostras é apresentada na tabela 3. Foram coletados para amostras de solo: macaxeira, manga, limão, maracujá e tomate, aproximadamente de 1 a 5 cm de solo com cerca de alguns gramas. Para os alimentos foram coletados 1 kg de macaxeira, 1 L de suco de limão, 1 kg de farinha de mandioca, 500g de casca de limão. Para a água coletamos de torneira e de poço e fertilizante químico.

Tabela 3:Relação de amostras pesquisadas no trabalho

Compartimento	Amostras Analisadas
Solo	-Macaxeira
	-Manga
	-Limão
	Maracujá
	-Tomate
Alimento	-Macaxeira;
	-Casca e suco de limão;
	-Farinha de mandioca (macaxeira);
Água	-Tratada;
	-Poço;
Fertilizante	-Químico;

As amostras sólidas foram colocadas em sacos plásticos e as líquidas em recipientes de plástico. Foram previamente identificadas e levadas para o Laboratório de Monitoração Ambiental (LMA) da Eletronuclear, Eletrobrás Termonuclear S.A., localizado em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro.

5.2.2 Procedimento de preparação de amostras

As amostras passaram por uma peneira de 16 mesh, e foram transferidas para o béquer Marinelli, no Laboratório de Monitoramento Ambiental (LMA); as líquidas foram filtradas em papel whatman número um e também transferidas para o béquer Marinelli. As amostras foram pesadas seguindo a expressão ($m_a = m_T - m_f$), onde m_a é a massa da amostra; m_T é a massa da amostra + a massa do frasco; m_f é a massa do frasco, e os frascos foram deixados em repouso por 25 dias, afim de se obter o equilíbrio radioativo; decorrido o prazo de repouso foram levadas para análise utilizando o equipamento de espectrometria gama.

5.2.3 Procedimentos e equipamentos para espectrometria gama

Neste trabalho foi utilizado para a detecção dos radionuclídeos o detector de germânio hiperpuro (HPGe), onde para medidas de baixos níveis de radiação o HPGe é o mais adequado, sendo sua eficiência superior a 40% para um analisador multicanal de 4096 canais.

O “Nuclear Instruments Modular” (NIM) foi o módulo de eletrônica utilizado com um amplificador de 575^a, fonte de alta tensão 659, placa multicanal (MCA) TrumpTM de 4096 canais para Windows. Com o aplicativo MaestroTM é feita a aquisição no microcomputador com a placa de MCA para ler o espectro posteriormente.

Para a blindagem foi utilizado o Canberra, com o modelo 747, com 10cm de chumbo, e 1 mm de estanho recoberto com 1,6 mm de cobre. E extrínseco a blindagem com 9,5 mm de aço com baixa porcentagem de carbono. O porta amostras utilizado neste trabalho foi o béquer Marinelli, que comporta de 1 a 2 kg de amostras, e até 1 L para amostras líquidas; esses béqueres foram adquiridos da “GA-MA Associates Incorporation”.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As amostras foram divididas nas seguintes categorias: Amostras de solo, alimentos, água e fertilizante. Todas as leituras das amostras foram feitas da mesma forma, utilizando o mesmo equipamento de espectrometria gama, com detector de germânio que, identifica e quantifica os radionuclídeos presentes na amostra.

Optou-se por trabalhar apenas com os radionuclídeos, entre eles o ⁴⁰K, ²¹²Bi, ²¹⁴Bi, ²¹²Pb, ²¹⁴Pb, ²³⁵U. A razão da escolha desses radionuclídeos se deu em decorrência da relevância com que se encontram na natureza e nos alimentos. Na literatura buscada notou-se uma relação de algumas características de mal-estar como: desconfortos estomacais, dores de cabeça, dentre outros e algumas enfermidades supostamente ligadas a esses

radionuclídeos; partindo disso, e pensando nas consequências desagradáveis que isso acarretará ao longo do tempo foi proposto estudar esses radionuclídeos (SHANTHI et al., 2012).

Quanto ao cuidado com a saúde o CNEM-NN -3.01 possui uma normativa que estabelece regras quanto as radiações ionizantes. Assim, com os resultados obtidos, foi possível comparar as atividades dos radionuclídeos com os outros trabalhos e fazer uma avaliação dos possíveis malefícios.

Em relação as normas de limites de exposição de radionuclídeos, o CENEN dispõe sobre requisitos de proteção radiológica. (CNEN PR-3.01-001 Limite dos critérios de exclusão, isenção e dispensa). Para cada radionuclídeo há uma especificação que pode ser vista na Tabela 4. O presente trabalho se baseou nesses limites afim de reportar a atividade dos radionuclídeos da região do CAUB I.

Tabela 4: Limites CNEN PR-3.01-001 (Bq/Kg⁻¹)

⁴⁰ K	²¹² Bi	²¹⁴ Bi	²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²³⁵ U
20000	10000	10000	10000	10000	10000

5.1 Amostras de solo

Foram utilizadas as amostras de solo de macaxeira, manga, limão e maracujá; todas foram retiradas da região do CAUB I utilizando as fazendas dos agricultores que cultivam naquela região. As atividades e os radionuclídeos podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5: Presença de radionuclídeos nas amostras de solo

Atividade específica em Bq/kg dos radionuclídeos nas amostras de solo						
Amostras	⁴⁰ K	²¹² Bi	²¹⁴ Bi	²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²³⁵ U
Macaxeira	27,03±0,27	12,57±,13	11,82±0,06	27,92±0,33	42,35±0,50	-
Manga	15,13±0,15	-	5,47± 0,03	10,55±0,14	16,0± 0,22	-
Limão	21,13±0,19	5,73± 0,04	7,20± 0,03	18,13±0,20	27,50±0,30	-
Maracujá	-	8,74± 0,12	10,36±0,04	20,47±0,26	31,04±0,40	-
Tomate	44,27±0,28	11,66±0,14	10,50±0,05	33,94±0,30	55,5± 0,50	-

Os radionuclídeos encontrados no solo e nos vegetais e que conseqüentemente passam para a cadeia alimentar são provindos da atmosfera, e passam por algumas misturas; nesse contexto pode-se notar que há atividade radioativa em todo solo estudado, principalmente com os elementos pesquisados ⁴⁰K, ²¹²Bi, ²¹⁴Bi, ²¹²Pb, ²¹⁴Pb.

Sabe-se que na crosta terrestre estão presentes os principais radionuclídeos, oriundos das séries do ²³⁸U e do ²³²Th. Em nenhuma amostra do solo detectou-se o ²³⁵U. Alguns efeitos do urânio no organismo são dores de cabeça, vômitos, queimaduras, diarreias, náuseas, e ainda atingem vários sistemas do corpo humano; ele não pode ser eliminado pelo organismo ficando retido e acumulado nos ossos e pode causar doenças como o câncer. Segundo CARDOSO et al. (2009) a variação de urânio no solo na Unidade de Atividade de Urânio, que fica situada no estado da Bahia é em média 50 Bq kg⁻¹. Como pode ser visto na tabela 5, em grande parte dos trabalhos o ²³⁵U não foi detectado, apenas FAUSTO *et al.* (1995) detectou o ²³⁵U com uma atividade de 20 Bq kg⁻¹. No presente trabalho o urânio não foi detectado para as amostras de solo.

O urânio encontrado principalmente nas rochas e solo possui atividade que varia em torno de 33 Bq kg⁻¹ e suas concentrações podem ser de aproximadamente 120 ppm influenciando em toda cadeia alimentar (EISENBUD, 1987).

Trabalhos à respeito da atividade em solos podem ser destacados com UMISED (2007) na região de Embu, Itapeçerica da Serra e Suzano no estado de São Paulo; com

JÚNIOR (2009) na região de Pernambuco foram analisadas duas fazendas leiteiras. MEDEIROS (2003) e FAUSTO et al. (1995) também analisaram os radionuclídeos no solo, na região de Itú em São Paulo, como se verifica na Tabela 6.

Tabela 6: Atividade no solo dos radionuclídeos ^{40}K e ^{235}U (Bq/kg^{-1})

^{40}K	^{235}U	REFERÊNCIAS
36-340 (152±8)	-	UMISEDO (2007)
298-2274 (874±47)	-	JÚNIOR (2009)
44,27± 0,28	-	Presente trabalho
222	-	MEDEIROS (2003)
365	20	FAUSTO <i>et al.</i> (1995)

No trabalho de UMISEDO (2007) as atividades de ^{40}K variaram de $36\pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$ a um máximo de $340 \pm 20 \text{ Bq kg}^{-1}$ essas amostras foram coletadas no Mercado Livre do Produtor na região de São Paulo, o valor do presente trabalho, para o solo, foi de $44,27 \text{ Bq kg}^{-1}$, em comparação com a legislação do CENEN PR-3.01-001, os resultados de ambos trabalhos ficaram abaixo, uma vez que para o ^{40}K a atividade dos radionuclídeos aceitável é até 20000 Bq kg^{-1} .

O bismuto foi encontrado no solo com atividades pequenas que variam de um mínimo de $5,47\pm 0,03$ e máximo de $12,57\pm 0,13$. Já o chumbo variou de $10,55 \pm 0,14$ a $55,5\pm 0,50 \text{ Bq kg}^{-1}$. A legislação do CENEN PR-3.01-001 contempla uma atividade de até 10000 Bq kg^{-1} para o ^{212}Bi e ^{214}Bi .

A Figura 15 reproduz graficamente os resultados da tabela 4: Pode-se observar que o solo da plantação de tomate teve a maior atividade em relação aos demais, seguido da macaxeira, maracujá, manga e limão. Em relação aos radionuclídeos o ^{214}Pb apresentou maior atividade em relação aos outros, o ^{235}U não foi detectado em nenhuma das amostras de solo.

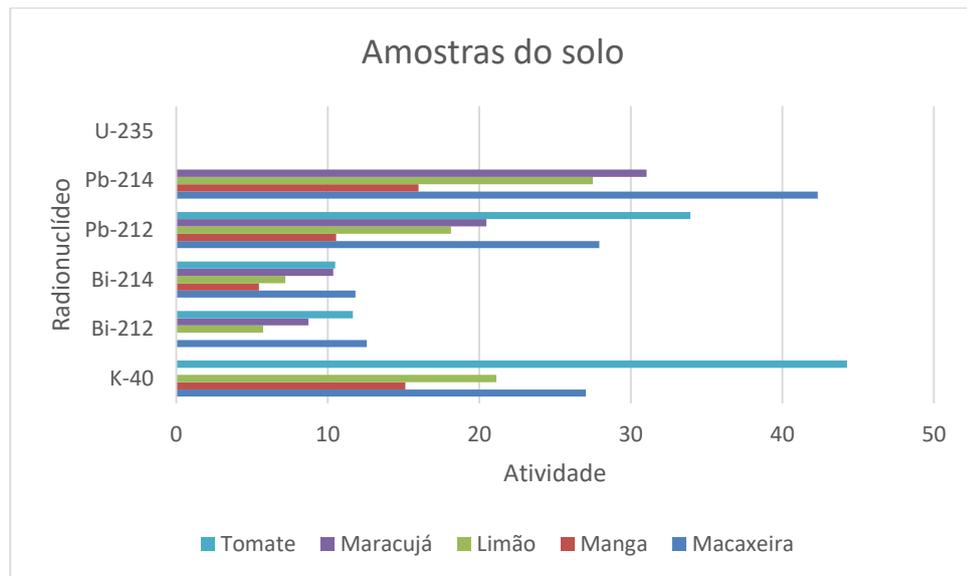


Figura 15: Gráfico das amostras do solo e seus radionuclídeos em relação às atividades que emitiram durante a análise de Espectrometria Gama.

5.2 Amostras de alimentos

Foram utilizadas amostras de macaxeira, suco de limão, farinha de mandioca e casca de limão. As atividades e os radionuclídeos podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7: Presença de radionuclídeos nas amostras de alimentos

Atividade específica em Bq/kg dos radionuclídeos nas amostras de alimentos						
Amostras	⁴⁰ K	²¹² Bi	²¹⁴ Bi	²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²³⁵ U
Macaxeira	8220,6±26,6	-	45,4±0,58	6,95±0,19	28,8±0,5	578,7±51,4
Suco de Limão	36,0±2,1	-	6,3±0,9	-	2,64±0,55	-
Farinha de mandioca	106,5±0,4	-	3,00±0,02	-	1,95±0,06	39,27±0,42
Casca de limão	0,24±0,09	0,01±0,00	0,02±0,00	0,01±0,00	0,02±0,00	-

Para o trabalho de BUENO (1999) alguns alimentos possuem uma maior atividade de ^{210}Pb ($0,15\pm 0,05$ a $0,20\pm 0,06$ Bq/kg) e esses valores foram constatados em verduras; sabe-se que o consumo de alimentos é um dos principais caminhos de contaminação cerca de 87,5% do consumo de ^{210}Pb deve-se aos alimentos, 12,9% ao ar e 2,9% ocorre pela água.

O ^{40}K variou de 21 ± 1 a 118 ± 6 Bq/kg para amostras de hortaliças. E amostras de ^{238}U ficaram abaixo de 2 Bq/kg (UMISEDO, 2007). Segundo VENTURINI E SORDI (1999) eles analisaram o ^{40}K e encontraram uma atividade de 137 Bq/kg para o alface e 69,7 Bq/kg para a cenoura. A propósito dos radionuclídeos da série do urânio os valores variaram de 0,05 a 0,75 Bq/kg.

Para o repolho e o brócolis as atividades de ^{238}U foram 0,7 a 1,0 Bq/kg, apenas duas ultrapassaram as medidas (UMISEDO, 2007). No presente trabalho, obteve-se uma variação do ^{40}K de 0,24 a 8226 Bq/kg, sendo encontrado em todas as amostras de alimentos e na macaxeira foi constatada uma presença mais acentuada. A atividade do ^{40}K foi de 41,10% abaixo do limite estabelecido no CENEN, que se encontram na Tabela 4.

A Tabela 8 mostra algumas referências que destacam a atividade de hortaliças e verduras do presente trabalho e alguns trabalhos antigos em relação ao ^{40}K e para o ^{235}U a atividade da farinha de mandioca.

Tabela 8: Atividade nos alimentos dos radionuclídeos ^{40}K e ^{235}U (Bq/kg⁻¹)

^{235}U	^{40}K	REFERÊNCIAS
-	21 ± 1 a 118 ± 6	UMISEDO (2007)
-	137	VENTURINI E SORDI (1999)
$39,27\pm 0,42$	$8220,6\pm 26,6$	Presente trabalho
$4,2\pm 1,0$	-	AROGUNJO <i>et al.</i> (2004),

A atividade específica determinada para o ^{235}U na farinha de mandioca foi de $39,27\pm 0,42$ Bq/kg⁻¹ e apresentou um valor superior comparado à atividade encontrada por

AROGUNJO *et al.* (2004), $4,2 \pm 1,0 \text{ Bq/kg}^{-1}$, o ^{235}U ficou abaixo 0,39% da especificação do CENEN PR-3.01-001 que é de 10000 Bq/kg^{-1} .

A Figura 16 apresenta graficamente a relação dos alimentos com os radionuclídeos analisados pela técnica de espectrometria gama. Há uma grande discrepância dos valores, pois a macaxeira apresentou um resultado bastante alto quando comparado aos demais alimentos, para o ^{40}K . O elemento ^{235}U apresentou a segunda maior atividade também para a macaxeira, já o ^{212}Bi e o ^{212}Pb não apresentaram atividade nas amostras.

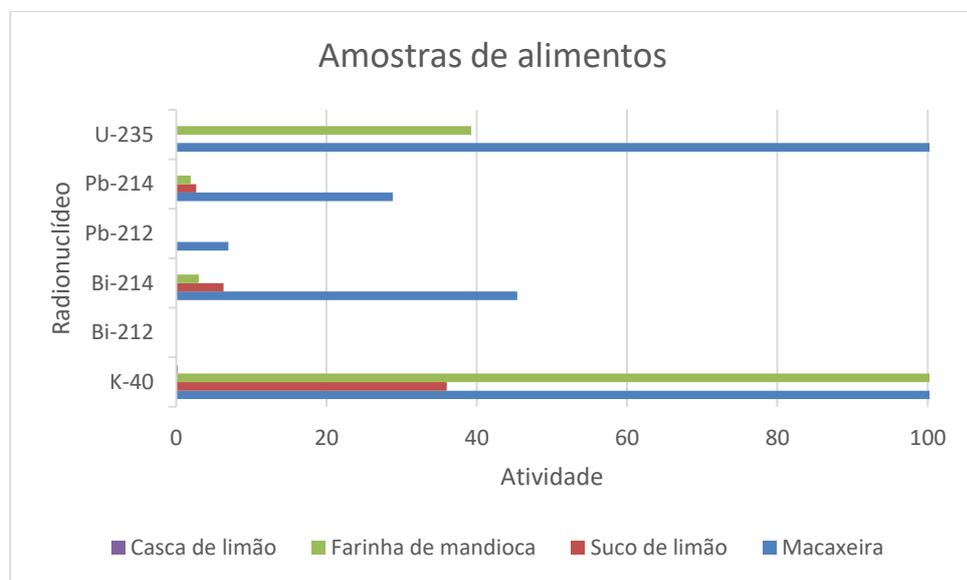


Figura 16: Gráfico das amostras de alimentos e seus radionuclídeos em relação às atividades que emitiram durante a análise de Espectrometria Gama.

5.3 Amostras de água

Existem alguns radionuclídeos nos recursos hídricos, cuja presença pode ocorrer por vários fatores, desde fertilizantes até descargas de efluentes, contaminando lençóis freáticos, podendo contaminar toda a cadeia alimentar.

No Brasil, a legislação da portaria MS n.º. 2914/2011 determina normas para a qualidade da água de consumo humano e estabelece os valores de referência de $0,5 \text{ Bq/L}$ para radioatividade alfa total e de $1,0 \text{ Bq/L}$ para radioatividade beta total (MINGOTE *et al.*, 2013).

Com isso, alguns órgãos estabelecem valores referentes à dosagem de radiação na água. A Organização Mundial de Saúde (WHO) expressa a quantidade de 0,1 mSv ano⁻¹ para o consumo de 2 L dia⁻¹ em um ano, sendo esse valor também recomendado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) e pela Agencia Internacional de Energia Atômica (IAEA).

O urânio e o rádio são os radionuclídeos que mais aparecem em águas, sendo que para o urânio as atividades variam de 1 Bq/L para ²³⁴U e 10 Bq/L para ²³⁸U. No presente trabalho avaliamos o ²³⁵U detectado na água de poço. A Tabela 9 descreve as atividades presentes na água na região do CAUB I.

Tabela 9: Presença de radionuclídeos nas amostras de água

Atividade específica em Bq/kg dos radionuclídeos nas amostras de água

Amostras	⁴⁰ K	²¹² Bi	²¹⁴ Bi	²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²³⁵ U
Água de Poço	4,02±0,64	-	0,88±0,12	0,32±0,07	-	27,95±2,1
Água Tratada	15,38±1,2	-	1,44±0,01	-	1,32±0,01	-

A Tabela 9 mostra as concentrações dos radionuclídeos nas amostras de água. Foram constatadas as presenças de ⁴⁰K, ²¹⁴Bi, ²¹²Pb e ²³⁵U, sendo o urânio com a maior atividade de 27,95 Bq/kg. Segundo (GORDON, 1992) concentrações de urânio geralmente são inferiores a 1mg/L ainda que podendo variar a níveis bem mais elevados em águas subterrâneas. Na Tabela 10 pode-se notar que não foi possível obter muitas referências, pois a grande maioria dos trabalhos que se refere a água trata de pesquisa sobre metais pesados, especialmente do ²¹⁰Pb como foi citado no presente trabalho.

Tabela 10: Atividade na água dos radionuclídeos ^{40}K e ^{235}U (Bq/kg^{-1})

^{235}U	^{40}K	REFERÊNCIAS
-	-	RUSSO (2013)
27,95	4,02	Presente trabalho
706	-	YAMAZAKI <i>et al.</i> (2003)

O ^{40}K é muito abundante e existe em quase todas as amostras; o mesmo variou de 4,02 a 15,4 Bq/kg^{-1} no presente trabalho. Para o ^{214}Pb o valor encontrado foi de 0,32 Bq/kg^{-1} para água de poço. Em pesquisa desenvolvida por Carlos et al., 2004 foi encontrado 0,10 Bq/kg^{-1} para o ^{210}Pb . Em relação as normas do CENEN da Tabela 4, o presente trabalho obteve resultados abaixo da especificação 0,02% para o ^{40}K e 0,28% para o ^{235}U .

A Figura 17 apresenta graficamente os radionuclídeos e suas respectivas atividades. Nas amostras coletadas de água, pôde-se detectar a presença do ^{235}U com uma atividade maior em relação às demais amostras para a água de poço, porém na água tratada pode-se notar níveis consideravelmente menores do ^{235}U e o ^{212}Bi não foi detectado.

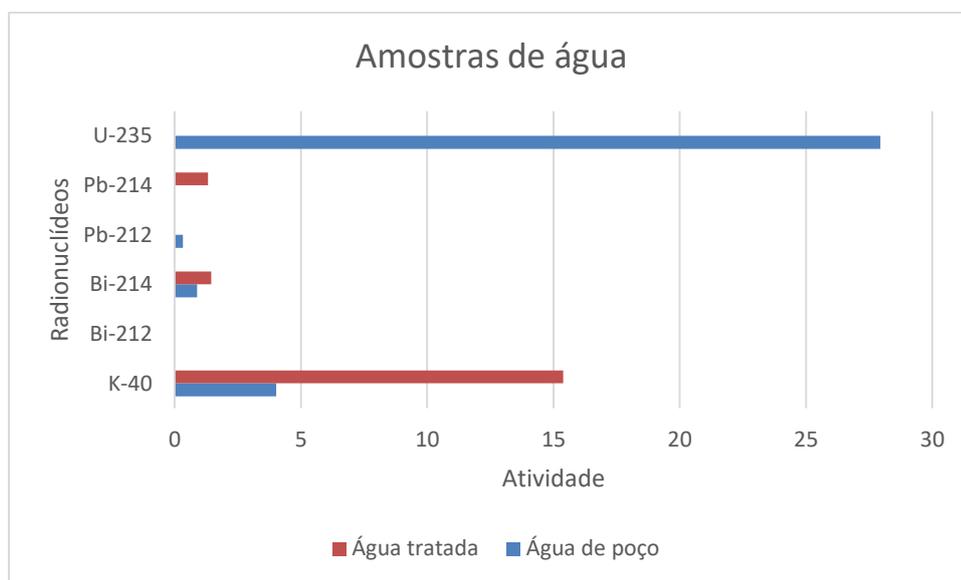


Figura 17: Gráfico das amostras de água e seus radionuclídeos em relação às atividades que emitiram durante a análise de Espectrometria Gama.

5.4 Amostra de fertilizante

Os fertilizantes visam nutrir e aumentar a produtividade das plantas. São compostos minerais ou orgânicos, ainda assim seu uso discriminado pode causar a poluição de solos e água. Os radionuclídeos se fazem presentes em rochas fosfáticas, sendo assim, por consequência também nos fertilizantes. Alguns elementos como o ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K ao decaírem redistribuem no meio ambiente através do cultivo rural. Também com o uso desenfreado de fertilizantes, no solo, nota-se o crescente aumento de metais pesados, o chumbo está nas cadeias dos radionuclídeos primordiais, como o elemento que estabiliza a mesma. E devido a suas altas concentrações e toxicidade, não pode ser degradado naturalmente, se acumulando no meio, por tempo indeterminado (CONCEIÇÃO, 2004).

Nesse contexto, foi avaliado um fertilizante que é usual nas lavouras da região do CAUB I. Na Tabela 11 foram demonstradas as atividades dos radionuclídeos em Bq/kg^{-1} .

Tabela 11: Presença de radionuclídeos nas amostra de fertilizante

Atividade específica em Bq/kg dos radionuclídeos na amostra de fertilizante						
Amostras	^{40}K	^{212}Bi	^{214}Bi	^{212}Pb	^{214}Pb	^{235}U
Fertilizante	$3908,3 \pm 0,90$	-	-	-	-	$39,33 \pm 6,7$

Pôde-se constatar a presença do ^{40}K com atividade de $3908 \pm 0,90$ e do ^{235}U com atividade de $39,33 \pm 6,7 \text{ Bq kg}^{-1}$. Para GARCÊZ (2016) a atividade média encontrada em fertilizantes fosfatados foi 1017 ± 41 para o ^{40}K . A Tabela 12 faz um comparativo das atividades de alguns trabalhos, comparando-os ao presente trabalho. Em relação a legislação do CENEN PR-3.01-001 os resultados obtidos para a amostra de fertilizante foi abaixo da especificação que é 20000 Bq kg^{-1} para o ^{40}K , com isso, 19,54% do ^{40}K que foi encontrado na região do CAUB I está abaixo da especificação.

Tabela 12: Atividade nos fertilizantes dos radionuclídeos ^{40}K e ^{235}U (Bq kg^{-1})

^{235}U	^{40}K	REFERÊNCIAS
-	1017±41	GARCÊZ (2016)
-	-	RUSSO (2013)
39,33±6,7	3908±0,90	Presente trabalho
706	-	YAMAZAKI <i>et al.</i> (2003)
-	207,3	KHAN <i>et al.</i> (1998)

Para o trabalho de YAMAZAKI o ^{235}U teve uma atividade de 706 Bq/kg^{-1} nos fertilizantes produzidos no Brasil (YAMAZAKI; GERALDO, 2003). Um valor relativamente alto em comparação ao que no presente trabalho foi constatado de 39,33 Bq/kg^{-1} . Para o trabalho de Russo foi observado nos fertilizantes fosfatados a presença de ^{210}Pb com concentração de 38 Bq/kg^{-1} na região de Cubatão, não foi detectado o ^{212}Pb e ^{214}Pb no presente trabalho (RUSSO, 2013). Algumas referências publicadas pela UNSCEAR (2000) apontam concentrações no solo de 140 Bq/kg^{-1} para ^{40}K , e 46 Bq/kg^{-1} para o ^{238}U . KHAN trabalhou com os radionuclídeos de diferentes marcas no Paquistão para o ^{40}K obteve uma média de 207,3 Bq/kg^{-1} .

Apesar de no fertilizante ter sido detectado somente o ^{40}K e o ^{235}U , sabe-se que os outros elementos estão na cadeia do urânio e sendo assim, pode-se considerar que toda a cadeia está contaminada com os radionuclídeos do presente trabalho, uma vez que ocorre o decaimento radioativo. A maioria dos autores preferem trabalhar com os radionuclídeos primordiais, por isso há uma certa dificuldade de encontrar valores relacionados a Pb e Bi e no presente trabalho ambos não foram detectados.

A Figura 18 apresenta a atividade dos radionuclídeos analisados para a amostra de fertilizante químico, onde houve um valor bastante significativo para o ^{40}K . O ^{235}U apresentou a segunda maior atividade, os demais elementos não foram detectados no fertilizante.

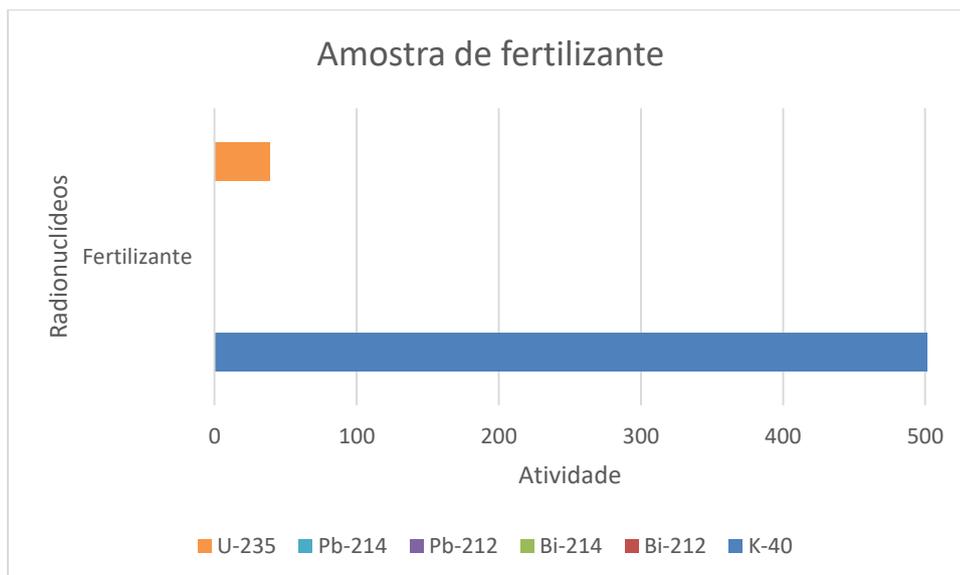


Figura 18: Gráfico da amostra de fertilizante e seus radionuclídeos em relação às atividades que emitiram durante a análise de Espectrometria Gama.

6 RADIONUCLÍDEOS X HOMEM

Notou-se com os resultados apresentados, que o fertilizante químico, que é utilizado em lavouras e em praticamente todos os alimentos, contaminam o ambiente sendo capaz de ser detectado desde lençóis freáticos até o solo, chegando por conseguinte o homem. Os radionuclídeos naturais, por sua vez, são encontrados na atmosfera devido ao fallout, e através da contaminação do solo e água. Na Figura 19 pode-se constatar como esse fenômeno isso se dá.

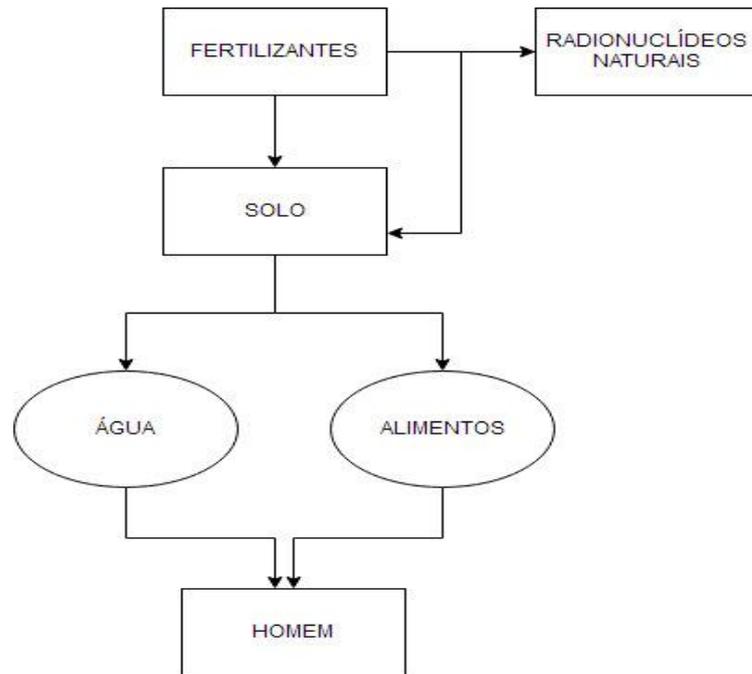


Figura 19 - Fluxograma da representação dos radionuclídeos desde os fertilizantes até o homem

Segundo ROCHEDO (2003) os radionuclídeos presentes nas plantas deve-se principalmente a adsorção e deposição que a radiação, seja ela de material radioativo ou outros, se deposita na superfície foliar da planta; o vento também pode contribuir para essa deposição, bem como a erosão e o fato da superfície do solo não ser plana também contribui para os radionuclídeos adentrarem na terra. Uma vez que a alimentação humana é composta de até 97% de vegetais, podemos considerar que grande parte dos radionuclídeos chega à mesa do homem.

Grande parte de solos, rochas e minerais apresentam uma quantidade significativa de urânio e tório, que são originais das cadeias radioativas, em decorrência do decaimento o restante dos radionuclídeos também irá aparecer. Com relação a contaminação no homem pode-se dizer que como as meias-vidas desses radionuclídeos são curtas, grande parte dos radionuclídeos incorporados por inalação ou ingestão decai no organismo dos animais e do homem, onde acontece a transferência de radiação nos órgãos e tecidos (TAUHATA et al.,2003).

Os radionuclídeos naturais, como já foi dito são provenientes de fusão nas estrelas e os

artificiais conhecidos como *fallout* são provenientes de testes em bombas nucleares. O *fallout* pode ser considerado um perigo em potencial, uma vez que ao adentrar no solo os produtos de uma explosão nuclear podem se depositar diretamente nos alimentos do homem, seja de animais ou vegetais por via foliar ou através do solo.

A principal fonte de radiação da atmosfera entre as décadas de 40 a 70 foi teste de armas nucleares e o *fallout* dos resíduos radioativos como fonte de liberação de elementos artificiais. Para a década de 80 a principal fonte de contaminação foram os acidentes radiológicos, destacam-se o reator nuclear em Chernobyl, em abril de 1986, fato também observado nas cidades Hiroshima e Nagasaki devido à explosão de bombas atômicas em 1945. Também foi constatado que o hemisfério norte tem um *fallout* de ^{137}Cs maior que o hemisfério sul devido a testes nucleares frequentes no hemisfério norte.

7 CÁLCULO DA DOSE EFETIVA

Pode-se definir a dose efetiva como sendo a soma de doses equivalentes no organismo, seja nos tecidos ou órgãos, para tanto como forma de calcular esses danos utilizamos a Equação 18,

$$DE = e(g).A.T, \quad (18)$$

Considerando-se DE como a dose efetiva, $e(g)$ é o coeficiente de dose efetiva (em Sv/Bq); A é a atividade específica do radionuclídeo (em Bq/kg) e T a taxa de consumo anual (em kg/ano) do alimento.

Contudo, para a precisão do cálculo o parâmetro do coeficiente da dose efetiva tem um referencial da (IAEA, 1996) onde será adotado para o presente trabalho. A tabela I do anexo mostra os valores do $e(g)$ para o cálculo da Dose Efetiva. As tabelas II e III do mesmo anexo contemplam o consumo alimentar das regiões do Brasil e sexo, respectivamente. A tabela IV do anexo referencia o consumo alimentar em g/ano dos alimentos em relação a sexo e região do Brasil.

Nas tabelas 13 e 14 estão dispostos as doses efetivas da macaxeira e da farinha de mandioca, respectivamente, dos radionuclídeos calculada pela equação 16. O sexo feminino e masculino generaliza-se para todo o Brasil já a região Centro-Oeste destaca-se a região de onde foram feitas as coletas do respectivo trabalho.

Tabela 13: Dose Efetiva da Macaxeira em 1 ano (Sv/a)

Macaxeira			
	Feminino	Masculino	Centro-Oeste
^{40}K	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$2,95 \cdot 10^{-4}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
^{214}Bi	$2,00 \cdot 10^{-8}$	$2,63 \cdot 10^{-8}$	$1,90 \cdot 10^{-8}$
^{212}Pb	$2,76 \cdot 10^{-7}$	$3,63 \cdot 10^{-7}$	$2,62 \cdot 10^{-7}$
^{214}Pb	$1,27 \cdot 10^{-8}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$	$1,20 \cdot 10^{-8}$
^{235}U	$1,20 \cdot 10^{-8}$	$1,57 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$

Tabela 14: Dose Efetiva de Farinha de mandioca em 1 ano (Sv/a)

Farinha de mandioca			
	Feminino	Masculino	Centro-Oeste
^{40}K	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$2,34 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-7}$
^{214}Bi	$5,80 \cdot 10^{-10}$	$1,06 \cdot 10^{-9}$	$5,48 \cdot 10^{-11}$
^{212}Pb	-	-	-
^{214}Pb	$3,77 \cdot 10^{-10}$	$6,90 \cdot 10^{-10}$	$3,56 \cdot 10^{-11}$
^{235}U	$3,57 \cdot 10^{-10}$	$6,53 \cdot 10^{-10}$	$3,37 \cdot 10^{-11}$

Calculando-se a dose efetiva para a macaxeira e a farinha de mandioca obtidas nos alimentos; para a casca de limão e suco de limão não foi possível, uma vez que não temos o coeficiente de dose efetiva para ambos.

Esses valores obtidos relacionam-se a quantidade de radionuclídeos recebidos pelo organismo em gramas por ano, onde constatou-se que a dose anual é pequena, já que o coeficiente de dose efetiva fica em torno da exponencial 10.

A UNSCEAR (2000) tem que a dose do radionuclídeo ^{214}Bi corresponde a cerca de 26% do valor da referência ($0,25 \mu\text{Sv/a}$); para o ^{214}Pb foi apenas 0,24% do valor da referência ($21 \mu\text{Sv/a}$). Para o ^{235}U foi encontrado um valor referente à dose efetiva comprometida a partir da ingestão de alimentos do Rio de Janeiro com $0,1 \mu\text{Sv/a}$ (SANTOS *et al.*, 2001).

As doses efetivas no presente trabalho estão bem abaixo para o referencial da UNSCEAR (2000) que é de 140 $\mu\text{Sv/a}$ para as séries do urânio e tório, entretanto os valores encontrados no CAUB I referem-se a dieta alimentar diária daquela população.

7 CONCLUSÃO

Sabe-se que os radionuclídeos que passam pela cadeia alimentar do homem, estão diretamente ligados à nossa dieta. E o consumo de alimentos e água contaminados ao longo do tempo, pode desencadear uma série de problemas em relação a saúde, uma vez que a exposição aos radionuclídeos ocorre desde o cultivo na lavoura, utilizando fertilizantes que contaminam o solo, a água e os alimentos e chegam até a mesa do homem.

No trabalho atual verificou-se a presença de radionuclídeos naturais, que começam no urânio e vão decaindo até o chumbo, nas séries de decaimentos radioativos citados na literatura. Nota-se, que há presença desses radionuclídeos, entretanto a dosagem é pequena e a exposição prejudicial só é notada quando acontece em longos períodos para a população em geral. Já quem trabalha diretamente com esta exposição, de fertilizantes, por exemplo, tende a sofrer mais com os efeitos nocivos da radiação.

Contudo, nota-se que no presente trabalho, para o elemento Potássio - 40, obteve-se uma variação de 0,24 a 8226 Bq/kg, sendo encontrado em todas as amostras de alimentos; na macaxeira foi constatada uma maior incidência. Isto nos leva a uma inquietação, uma vez que há presença de potássio - 40 em grande parte dos alimentos que o homem consome.

Nas amostras de solo obteve-se o ^{40}K em todas as amostras, seguidas pelo ^{214}Bi e ^{214}Pb sendo que o chumbo é o último elemento na cadeia de decaimento. O urânio não foi encontrado para o solo, mas seus sucessores como foi dito, sim. Já na água e no fertilizante o ^{40}K e o ^{235}U se fizeram presentes. A presença de urânio é uma constatação de que os radionuclídeos naturais estão no nosso planeta e que há o consumo frequente deles, certificando que com o passar dos anos toda a cadeia radioativa irá decair até se estabilizar no chumbo.

Enfim, apurou-se a presença de radionuclídeos no CAUB I, onde foram destacados alguns radionuclídeos naturais, não observou-se a presença de radionuclídeos antropogênicos. Por fim foi calculada a dose efetiva de radiação para alguns alimentos. Discutiu-se como ocorre a transferência dos radionuclídeos para os alimentos e também a atividade dos mesmos, calculada através da espectrometria gama, onde constatou-se que a dosagem para a região do CAUB I está abaixo dos limites da CENEN, entretanto não exime supostas doenças causadas por esses radionuclídeos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, F. S. Urânio natural na dieta e no leite do bovino no agreste semi-árido do estado de pernambuco agreste semi-árido do estado de Pernambuco. 2006. Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco.

AQUINO, R. R. DE. Avaliação da radioatividade natural em areias das praias da Grande Vitória, Espírito Santo, 2010. Dissertação (Mestrado em ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSUNÇÃO, R. M. et al. Mapas de taxas epidemiológicas: uma abordagem Bayesiana. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 14, n. 4, p. 713–723, 1998.

AYRES, F. M. et al. Low doses of gamma ionizing radiation increase hprt mutant frequencies of TK6 cells without triggering the mutator phenotype pathway. **Genetics and Molecular Biology**, v. 29, n. 3, p. 558–561, 2006.

AROGUNJO, A. M., OFUGA, E. E. e AFOLABI M. A. Levels of natural radionuclides in some Nigerian cereals and tubers. *Journal of Environm. Radioactivity*, Vol. 82, pag. 1-6, 2004.

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

BITELLI, T. Dosimetria e Higiene das Radiações. São Paulo: Ed. Grêmio Politécnico, 1982. AQUINO, R. R. DE. Avaliação Da Radioatividade Natural Em Areias Das Praias Da. 2010.

BOSTICK, B. C.; CHOROVER, J. O. N. Cesium Adsorption on Clay Minerals: An EXAFS Spectroscopic Investigation. v. 36, n. 12, p. 2670–2676, 2002.

BUENO, L. Análise de radionuclídeos naturais e chumbo em produtos alimentícios e dietas luciana bueno. **IPEN**, 1999.

CARDOSO, G. V.; SOBRINHO, N. M. B. A.; AL, W. ET. Geoquímica de radionuclídeos naturais em solos de áreas circunvizinhas a uma unidade de mineração e

atividade de urânio. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1909–1917, 2009.

CARLOS, F. et al. Manejo agrícola e teores de radionuclídeos naturais em vegetais cultivados no Rio de Janeiro. **Cnen**, 2004.

CASTRO, L. P. D. E. Radionuclídeos naturais e ^{137}Cs em cogumelos comestíveis comercializados em São Paulo-Brasil São Paulo. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) Universidade de São Paulo, São Paulo.

CONCEIÇÃO, F. T. DA. Comportamento geoquímico de radionuclídeos e metais pesados em solos da bacia do rio corumbataí (SP). 2004. Tese (Doutorado em Geologia Regional) Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

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

GARCÊZ, W. D. R. Determinação das atividades específicas de Ra, Ra e K em amostras de fertilizantes minerais. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GARCIA, F. et al. Uranium levels in the diet of São Paulo City residents. **Environment International**, v. 32, n. 5, p. 697–703, 2006.

GLASSTONE, S.; DOLAN, P. J. The Effects of Nuclear Weapons. p. 653, 1977.

HEIGHTS, L. Australian Atomic Energy Commission. **Nature**, v. 177, n. 4516, p. 927–927, 1956.

ICRP. Annals of the ICRP 60. **Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60**, p. 130, 2012.

KNOLL, G. E.; WILEY, J. **Radiation Detectibn and Measurement**. 1999.

MINGOTE, R. M.; COSTA, H. F.; VAVASSORI, G. Determinação de Atividades Alfa e Beta Total em Água para Consumo Humano por LSC Visão Geral. **IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety – IRPA2013**, 2013.

- MONTANHEIRO, M. N. S. INTRODUÇÃO À ESPECTROMETRIA GAMA. 1977.
- NATIONS, U. SOURCES , EFFECTS AND RISKS. 1988.
- NOUAILHETAS, Y.; EDUARDO, C.; ALMEIDA, B. DE. Radiações Ionizantes e a vida. **Cnen**, p. 42, 2008.
- OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia. v. 27, n. 77, p. 185–200, 2013.
- OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. Física das Radiações. **Física das Radiações**, p. 21, 2010.
- PANAMERICANA, O. S. Las Radiaciones Ionizantes y sus Efectos en la Población. 1959.
- PESSOA, F.; SANTOS, D. E. C. Radionuclídeos naturais em águas minerais comercializadas na cidade de Recife - PE. 2010.
- RUSSO, A. C. Avaliação da Biodisponibilidade dos radionuclídeos Ra, Ra e Pb presentes nos fertilizantes fosfatados e no fosfogesso de procedência nacional. 2013.
- SCHEIBEL, V. Determinação das doses efetivas por ingestão de farinhas de cereais através da espectrometria de raios gama. **Universidade Estadual de Londrina**, 2006. Tese (Doutorado em Física) Universidade de Londrina, Paraná.
- SHANTHI, G. et al. Transfer factor of the radionuclides in food crops from high-background radiation area of south west India. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 149, n. 3, p. 327–332, 2012.
- TAUHATA, L.; PRINZIO, R. DI; PRINZIO, A. R. DI. Radioproteção e Dosimetria: fundamentos. p. 254, 2003.
- UMISEDO, N. K. Universidade de São Paulo Faculdade de Saúde Pública Dose de radiação ionizante decorrente do uso de fertilizantes agrícolas Dose de radiação ionizante decorrente do uso de fertilizantes agrícolas. 2007.
- VASCONCELOS, D. C. Estudo da radioatividade natural em areias de praias no extremo sul da Bahia utilizando métodos de análises nucleares. 2010.

WALKER, J. **Fundamentos de física volume 4 : óptica e física moderna**, 2011.

YAMAZAKI, I. M.; GERALDO, L. P. Uranium content in phosphate fertilizers commercially produced in Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 59, n. 2–3, p. 133–136, 2003.

YOSHIMURA, E.M., OKUNO, E. Espectrometria gama, Termoluminescência e ativação neutrônica aplicadas ao estudo da radioatividade do solo. In: Resumo expandidos do 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica e 1ª Conferência da União Latino-Americana de Geofísica; Rio de Janeiro, v.II, 929- 932, 1995.

ANEXOS

ANEXO 1: TABELAS DE REFERÊNCIA DE CÁLCULO DE DOSE

Tabela I: Coeficiente da Dose Efetiva (IAEA, 1996).

Nuclídeo	f ₁	ano		
		1-2	7-12	>17
		ano	ano	ano
K-40	1,000	4,2.10 ⁻⁸	1,3.10 ⁻⁸	6,2.10 ⁻⁹
Bi-212	0,100	1,8.10 ⁻⁹	5,0.10 ⁻¹⁰	2,6.10 ⁻¹⁰
Bi-214	0,050	7,4.10 ⁻¹⁰	2,1.10 ⁻¹⁰	1,1.10 ⁻¹⁰
Pb-212	0,200	6,3.10 ⁻⁸	2,0.10 ⁻⁸	6,0.10 ⁻⁹
Pb-214	0,200	1,0.10 ⁻⁹	3,1.10 ⁻¹⁰	1,4.10 ⁻¹⁰
U-235	0,040	1,3.10 ⁻⁹	7,1.10 ⁻¹¹	4,7.10 ⁻¹²

f₁: absorção fracional (fator de transferência do radionuclídeo do trato gastrointestinal para o sangue).
e(g): coeficiente de dose efetiva.

Tabela II- Prevalência de consumo alimentar e consumo alimentar médio *per capita*,
por Grandes Regiões, segundo os alimentos - Brasil - período 2008-2009

(continua)

Alimentos	Prevalência de consumo alimentar (%)					Consumo alimentar médio <i>per capita</i> (g/dia)				
	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
Tomate	3,6	4,7	12,2	11,8	16,1	2,6	3,3	7,9	8,5	11,0
Outros legumes	1,6	1,8	8,5	6,1	7,3	1,4	1,1	7,0	4,1	8,2
Mandioca	3,0	3,4	2,0	4,3	5,4	7,7	7,0	3,8	7,9	11,5
Outros tubérculos	0,3	2,5	0,9	0,0	0,3	0,5	2,5	1,0	0,0	0,3
Manga	3,1	4,0	1,4	0,7	2,1	8,5	9,0	2,5	1,1	4,6
Outras frutas	5,6	4,9	5,1	5,9	3,9	9,7	8,3	6,7	9,4	5,6

Oleaginosas	1,0	1,0	0,7	1,4	0,5	1,1	0,4	0,2	0,6	0,2
Farinha de mandioca	45,3	18,2	1,8	0,7	1,3	46,2	11,5	0,8	0,2	0,5

Fonte: IBGE

Tabela III- Consumo alimentar médio *per capita* e percentual de consumo fora do domicílio em relação ao total consumido, por sexo, segundo os alimentos - Brasil - período 2008-2009

(continua)

Alimentos	Consumo alimentar médio <i>per capita</i> (g/dia)			Percentual de consumo fora do domicílio em relação ao total consumido (%)		
	Total	Masculino	Feminino	Total	Masculino	Feminino
Tomate	6,5	7,3	5,8	15,5	19,1	11,4
Mandioca	6,1	6,9	5,4	14,2	15,9	12,1
Outros tubérculos	1,2	1,3	1,1	5,3	9,3	0,8
Manga	4,7	4,9	4,5	17,6	23,4	11,7
Outras frutas	7,7	6,7	8,6	16,2	21,7	12,2
Oleaginosas	0,4	0,4	0,4	22,0	23,5	20,6
Farinha de mandioca	7,1	9,1	5,3	8,0	9,7	5,3
Farofa	1,9	2,2	1,6	28,0	33,2	21,4

Fonte: IBGE

Tabela IV: Referência de consumo alimentar em g/ano dos alimentos em relação a gênero localidade.

Alimentos	Feminino	Masculino	Centro-Oeste
Tomate	4,161	6,9715	4,015
Outros legumes	5,2195	4,4165	2,993
Mandioca	4,4165	5,8035	4,1975
Outros tubérculos	0,292	3,3945	0,1095
Manga	4,2705	8,541	1,679
Outras frutas	4,453	7,9205	2,044
Farinha de mandioca	1,9345	3,5405	0,1825