AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**AVALIAÇÃO DA RADIOATIVIDADE NATURAL E ARTIFICIAL EM RAÇÕES COMERCIAIS
PARA ANIMAIS DOMÉSTICOS**

Fernanda Cavalcante

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Brigitte R. Soreanu Pecequilo**

**São Paulo
2017**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avaliação da Radioatividade Natural e Artificial em Rações Comerciais para Animais Domésticos

Fernanda Cavalcante

Tese apresentada como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Doutor em
Ciências na área de Tecnologia Nuclear -
Aplicações.

Orientadora:

Brigitte Roxana Soreanu Pecequilo.

Versão corrigida

Versão original disponível no IPEN

São Paulo - SP
2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Cavalcante, Fernanda

Avaliação da Radioatividade Natural e Artificial em Rações Comerciais para Animais Domésticos / Fernanda Cavalcante; orientador Brigitte Roxana Soreanu Pecequilo. São Paulo, 2017.
133 f.:il.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2017.

1. Radiação Natural. 2. Espectrometria Gama. 3. Ração Animal. 4. Dose Absorvida Interna.

“Feliz aquele que transfere o que sabe
e aprende o que ensina” (Cora Coralina)

Aos mestres que fizeram parte da minha história,
em especial à Dra. Brigitte R.S. Pecequilo
e Dra. Adelaide de Almeida,
que orientaram meu caminho profissional.

AGRADECIMENTOS

Ao Marcos Vinícius N. Nakandakari, meu porto seguro, meu melhor amigo e companheiro. Obrigada pelo amor, pela paciência e constante incentivo. A vida é mais doce ao seu lado.

Aos meus pais, pelo amor infinito! Às minhas famílias Cavalcante, Nakandakari, Fogaça e Petroucic; exemplos de vida que estiveram ao meu lado durante toda a jornada de braços abertos.

À Dra. Brigitte Roxana Soreanu Pecequilo, pela valiosa orientação, incentivo e confiança, que me permitiram realizar este trabalho. Obrigada por não poupar esforços em dividir seu conhecimento; pelas críticas que enriqueceram o trabalho e pela paciência. Não menos importante, agradeço as inúmeras sugestões de filmes antigos, sorveterias, risoterias, livros e seriados.

À Dra. Sandra R. Damatto, por ceder parte de seu precioso tempo para me orientar nas preparações das amostras, por disponibilizar espaço físico e equipamentos em seu laboratório, pelas discussões e idéias para este trabalho.

À M.Sc. Camila Cazula, pelo aporte da maioria das amostras de ração e em tantos outros momentos que trouxe discussões preciosas, apoio, amizade e “causos” do metrô de São Paulo para chorar de rir.

Ao Dr. Marcelo B. Nisti, por incontáveis e valiosíssimas discussões sobre espectrometria gama e estatística, pelas sugestões e pelo apoio técnico.

À Dra. Cibele B. Zamboni, por participar nos exames de qualificação e seminário de área, cujas contribuições foram muito importantes.

À Dra. Márcia de Almeida Rizzutto, pela disponibilidade em realizar medidas no detector EDXRF, pelo tempo e paciência gastos para me instruir no uso do equipamento.

Ao Dr. Marcelo F. Máduar, pelas importantes sugestões ao trabalho, especialmente durante o exame de seminário de área.

Ao M.Sc. Marcos M. Alencar, por me ensinar e me acompanhar em algumas medidas de espectrometria alfa, por disponibilizar espaço físico e equipamentos em seu laboratório.

Ao Dr. Hélio Yoriaz e Dr. Paulo de Tarso D. Siqueira, pelos ensinamentos com a simulação utilizando o MCNP, além das valiosas sugestões e contribuições ao trabalho.

Ao Dr. Roberto Vicente e Dr. José Claudio Dellamano, pelas oportunidades em estagiar nas disciplinas de Radioproteção e Gerência de Rejeitos Radioativos, ampliando minha visão sobre a radioproteção.

Ao M.Sc. Paulo R. Nogueira, por dividir seus conhecimentos em espectrometria gama, eletrônica, física da música, história do Brasil, espiritismo, piadas atuais, novelas turcas e tantos outros, que tornaram esses anos mais ricos e divertidos.

Aos queridos amigos que o IPEN me presenteou: Crislene Mateus, Leandro M. Fonseca, Alice M. Ribeiro, Luís Flávio L. Teixeira, Carolina F. da Silva, Reginaldo R. Aquino, Ademar O. Ferreira e Bruna Castilho.

Aos meus amigos do peito e de longa data, que mesmo a distância acompanharam este trabalho: Letícia Sicchieri, Francisco G. Sampaio, Lucas Del Lama, Rodrigo Sato, Tiago Arruda, Ana Paula V. Cunha e Stela P. Nardi.

A todos os colegas e amigos do LRA, que estiveram presente e contribuíram com discussões para este trabalho, meu sincero agradecimento.

Ao Isaías J. A. Soares, pela disponibilização do modelo FAMB em L^AT_EX, para escrita dessa tese.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, em especial à Dra. Linda V. E. Caldas, Dra. Bárbara P. Mazzili e ao Laboratório de Radiometria Ambiental, pela disponibilidade de espaço e instrumentação.

À secretaria de pós graduação.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

“Outside of a dog, a book is a man’s best friend.

Inside of a dog it’s too dark to read.”

Groucho Marx

Avaliação da radioatividade natural e artificial em rações comerciais para animais domésticos

Fernanda Cavalcante

RESUMO

Os níveis de radioatividade natural do planeta e suas eventuais consequências são objeto de estudo da radioproteção ambiental. Nos últimos anos, as agências internacionais ligadas à proteção radiológica têm debatido as práticas até então estipuladas, no que diz respeito à proteção da fauna e flora, cuja filosofia acreditava que as recomendações sugeridas para a proteção do homem asseguravam que outras espécies estariam também protegidas. Assim, são necessários estudos sobre as concentrações de atividade dos radionuclídeos dispersos no meio ambiente, assim como as doses absorvidas por organismos de diferentes ecossistemas, pela exposição interna e externa. O Brasil possui a segunda maior população de cães e gatos do mundo e produz anualmente mais de 2 milhões de toneladas de rações. O presente trabalho investigou os níveis de radioatividade presentes em rações comerciais para cães e gatos, por meio da espectrometria gama de alta resolução. Os resultados mostraram concentrações abaixo da MDA para radionuclídeos artificiais e baixas concentrações para radionuclídeos naturais, cujos valores variaram de $0,9 \pm 0,3$ Bq/kg a $5,1 \pm 0,7$ Bq/kg para o ^{226}Ra , de $1,2 \pm 0,4$ Bq/kg a $11,1 \pm 1,0$ Bq/kg para o ^{232}Th e de 156 ± 7 Bq/kg a 410 ± 19 Bq/kg para o ^{40}K . Para verificar a composição de alguns minerais, foi empregada a técnica por EDXRF e, utilizando estatística multivariada, foi possível verificar as correlações entre os radionuclídeos e o conteúdo mineral encontrado. A boa correlação que foi observada entre as concentrações de ^{226}Ra , ^{232}Th e cálcio, pode estar associada ao uso de farinhas de carne e ossos na fabricação das rações. As doses internas para alguns órgãos foram inferidas pelo método de Monte Carlo, obtendo valores menores que $1 \mu\text{Gy}/\text{dia}$. Em síntese, os resultados mostraram que os níveis de atividade encontrados nas rações são baixos o suficiente para concluir que as marcas de ração canina avaliadas não fornecem riscos radiológicos para os animais que as consomem.

Natural and artificial radioactivity in commercial food for domestic animals

Fernanda Cavalcante

ABSTRACT

The levels of natural radioactivity throughout the planet and their eventual consequences are studied by Environmental Radioprotection. Over the past years, the international agencies concerned with radiation protection have debated over the practices conducted so far, regarding the protection of the fauna and flora, which believed that the recommendations implemented for human beings assured that other species were also protected. Thus, assessments of the activity concentration of different radionuclides in the environment, as well as the absorbed doses for species from different ecosystems, due to internal and external exposures, are needed. Brazil holds the second largest dog and cat population in the world and annually produces over 2 million tons of feed. The present work has investigated the radioactivity levels in commercial brands of dry dog and cat food, using high resolution gamma spectrometry. The results have shown activity concentrations for artificial radionuclides below the detector's Minimum Detectable Activity and also, low concentration levels for the natural radionuclides, varying from $0,9 \pm 0,3$ Bq/kg up to $5,1 \pm 0,7$ Bq/kg for ^{226}Ra , from $1,2 \pm 0,4$ Bq/kg up to $11,1 \pm 1,0$ Bq/kg for ^{232}Th and from 156 ± 7 Bq/kg up to 410 ± 19 Bq/kg for ^{40}K . In order to verify the mineral content in pet food, EDXRF technique was applied and, using multivariate statistics, correlations between the mineral and radionuclide content were verified. The good correlation observed between concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and calcium could be associated with meat and bone flour used in feed manufacturing. The internal dose for some organs were inferred by Monte Carlo method and the results were no higher than $1 \mu\text{Gy/day}$. In summary, results have shown that the activity levels found in the pet food are low enough to conclude that the brands evaluated carry no radiological risks for the animals that consume them.

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

1	Introdução	20
1.1	Objetivos	24
2	Aspectos Teóricos	25
2.1	Interação da radiação eletromagnética com a matéria	25
2.2	Espectrometria gama utilizando detector de germânio hiper puro	27
2.3	Proteção radiológica voltada a plantas e animais	32
2.4	Conceitos Dosimétricos	33
2.5	Simulação pelo Método de Monte Carlo: MCNP	37
2.6	Alimentos para animais domésticos	40
3	Materiais e Métodos	42
3.1	Amostragem e Preparo	42
3.2	Espectrometria Gama	43
3.3	Fluorescência de Raios-X	49
3.4	Simulação pelo método de Monte Carlo	51
3.4.1	Geometrias e materiais	51
3.4.2	Fonte de radiação e <i>tally</i>	53
4	Resultados e Discussões	56
4.1	Espectrometria Gama	56

4.1.1	Escolha do Tempo de Contagem	56
4.1.2	Concentração de Atividade das Amostras	58
4.2	Análise Elementar por EDXRF	66
4.3	Análise das Correlações	70
4.4	Análise de Risco por Ingestão	78
4.4.1	Verificação da Geometria do Corpo do Animal	78
4.4.2	Cálculo das Doses Absorvidas Internas	84
5	Conclusões	88
	Referências Bibliográficas	91
	Apêndice A - Concentração de atividade de cada amostra de ração obtida pelo HPGe	99
	Apêndice B - Contagens obtidas da fluorescência de raios - X	107
	Anexo A - Composição dos tecidos segundo ICRU	114

LISTA DE FIGURAS

1.1	Séries radioativas naturais: ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th . O esquema mostra os elementos que fazem parte de cada série, bem como suas meias vidas (adaptado de IAEA 2014).	21
2.1	Coeficiente de atenuação de massa para as interações fotoelétricas, Compton e produção de pares no cristal de germânio.	26
2.2	Esquema ilustrativo de um cristal de germânio em configuração coaxial, com contato tipo n na superfície externa ao cristal e janela de entrada (figuras adaptadas de Knoll (2000) e ficha técnica de detectores HPGe Canberra).	29
2.3	Diagrama de blocos de um sistema de detecção para espectrometria gama com configuração vertical: cargas elétricas são produzidas na interação da radiação com o volume ativo do cristal, são processadas pelo pré amplificador e registradas pelo analisador multicanal.	29
2.4	Ilustração de um espectro gama em função das interações fotoelétricas, Compton e produção de pares, com formação de picos de absorção total (a), Compton contínuo (b) e picos de escape duplo e simples (c).	31
2.5	Esquema para cálculo das doses absorvidas por plantas e animais, considerando os parâmetros de transferência e conversão de dose.	36
2.6	Etapas de possíveis eventos simulados pelo código MCNP, considerando a interação de fótons e elétrons.	38

3.1	(a) Grãos de ração canina, (b) moedor de café e almofariz de porcelana, (c) estufa para secagem, (d) amostra pulverizada, (e) frasco PEAD (f) frascos PEAD selados e identificados com o nome da amostra, massa e data de selagem.	44
3.2	(a) Ilustração do sistema de detecção com amostra posicionada sobre o cristal, instalado dentro de uma blindagem de chumbo com baixa radiação de fundo. O sistema é mantido em temperatura baixa por um reservatório de nitrogênio líquido. (b) Foto do sistema e (c) detalhes da blindagem citada e janela de carbono sobre o cristal.	45
3.3	Espectro bruto de uma amostra de ração canina (durante 150.000 s) e identificação dos picos de emissão gama dos radionuclídeos naturais de interesse nas rações avaliadas.	48
3.4	Esquema experimental utilizando o detector Amptek/Mini X para análise por fluorescência de raios-X. O feixe de fótons do tubo de raios-X (B) excita a amostra (A), cuja emissão de raios-X característicos é detectada pelo detector semiconductor SDD (C).	50
3.5	Espectro da amostra de ração canina Oa01, observado por meio do <i>software</i> de análise WinQxas (WINQXAS, 2002).	51
4.1	MDA em função do tempo de contagem para 4 energias gama, observadas da amostra de ração canina Ba01.	57
4.2	Derivadas das funções MDA em função do tempo de contagem para as energias gama selecionadas da amostra de ração canina Ba01.	58
4.3	Espectro gama simulado de uma fonte de ^{40}K com 400 Bq, considerando um detector de NaI (76,2 x 76,2 mm) e tempo de contagem de 150.000 segundos. A figura apresenta as regiões de espalhamento Compton largas, que abrangem a maioria das energias dos radionuclídeos das séries de urânio e tório.	60
4.4	Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais em 13 amostras de ração felina (<i>f</i>): fabricantes A – S, onde as letras minúsculas representam tipos diferentes, sendo <i>a</i> para animais adultos e <i>p</i> para filhotes.	61

4.5	Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais em 33 amostras de ração canina: fabricantes A – G, onde as letras minúsculas representam tipos diferentes, sendo <i>a</i> para animais adultos, <i>p</i> para filhotes e <i>s</i> para idosos.	62
4.6	Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais em 32 amostras de ração canina: fabricantes H – S, onde as letras minúsculas representam tipos diferentes, sendo <i>a</i> para animais adultos, <i>p</i> para filhotes, <i>s</i> para idosos e <i>w</i> dietética.	63
4.7	Gráfico de dispersão entre as concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{232}Th com seu respectivo coeficiente de correlação (intervalo de confiança igual a 95%, indicado pela elipse).	64
4.8	Gráfico de dispersão entre as concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{40}K com seu respectivo coeficiente de correlação (intervalo de confiança igual a 95%, indicado pela elipse).	65
4.9	Gráfico de dispersão entre as concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{232}Th e ^{40}K com seu respectivo coeficiente de correlação (intervalo de confiança igual a 95%, indicado pela elipse).	65
4.10	Exemplo de uma análise de agrupamento de 5 amostras de ração canina em relação à quantidades de cálcio e ferro (a). Os grupos podem ser formados a partir da análise de distância entre os dados (b).	67
4.11	Dendrograma do agrupamento das amostras, considerando as contagens das diferentes marcas de ração canina. Utilizou-se a medida de distância Euclidiana entre os elementos e o método de Ward para agrupamento. .	68
4.12	Descrição dos grupos identificados no dendrograma das amostras de ração, de acordo com os elementos químicos verificados no EDXRF. . .	69
4.13	Dendrograma do agrupamento de variáveis (utilizando o método de Ward), considerando as contagens das diferentes marcas de ração canina.	70
4.14	Autovalores correspondentes às componentes principais (dispersão) e a variância total explicada por cada uma (barras). Nota-se que as cinco primeiras componentes somam 82% da variância total e são suficientes para descrever todas as relações entre as variáveis consideradas neste trabalho.	73

4.15	Representação gráfica das variáveis analisadas em função de suas componentes principais	75
4.16	Representação gráfica das variáveis e observações em função de suas componentes principais.	76
4.17	Rações caninas diferenciadas de acordo com a a presença de farinha de vísceras (a) e farinha de carne e ossos (b).	77
4.18	Geometria utilizada no código Monte Carlo (MCNP), em plano frontal (esquerda) e transversal (direita).	78
4.19	Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla <i>et al.</i> , considerando o estômago como fonte radioativa e estômago como volume alvo	80
4.20	Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla <i>et al.</i> , considerando o estômago como fonte radioativa e fígado como volume alvo	80
4.21	Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla <i>et al.</i> , considerando o estômago como fonte radioativa e intestino como volume alvo	81
4.22	Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla <i>et al.</i> , considerando o estômago como fonte radioativa e ovários como volumes alvo	81
4.23	Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla <i>et al.</i> , considerando o estômago como fonte radioativa e pulmões como volumes alvo	82
4.24	Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla <i>et al.</i> , considerando o estômago como fonte radioativa e pâncreas como volume alvo	82
4.25	Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla <i>et al.</i> , considerando o estômago como fonte radioativa e coração como volume alvo	83
B.1	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 688 contagens para Si.	107

B.2	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1332 contagens para P.	108
B.3	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1974 contagens para S.	108
B.4	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 10025 contagens para Cl.	109
B.5	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: contagens para K.	109
B.6	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 31703 contagens para Ca.	110
B.7	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 9089 contagens para Ti.	110
B.8	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1752 contagens para Mn.	111
B.9	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 20687 contagens para Fe.	111
B.10	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1529 contagens para Cu.	112
B.11	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 10564 contagens para Zn.	112
B.12	Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1401 contagens para Sr.	113

LISTA DE TABELAS

3.1	Identificação das amostras de ração canina adquiridas comercialmente, classificadas pelo fabricante segundo a idade do animal e restrição nutricional.	42
3.2	Identificação das amostras de ração felina adquiridas comercialmente, classificadas pelo fabricante segundo a idade do animal e restrição nutricional.	43
3.3	Energias e probabilidades de emissão gama dos radionuclídeos naturais e artificiais considerados.	48
3.4	Descrição das geometrias e composição biológica dos volumes alvo para o modelo canino.	52
4.1	Atividade mínima detectável dos radionuclídeos artificiais das amostras de ração canina e felina.	59
4.2	Intervalo de concentração de atividade dos radionuclídeos naturais encontrados com suas respectivas incertezas entre parênteses. O valor mínimo corresponde a menor concentração encontrada acima do nível MDA.	59
4.3	Elementos encontrados nas rações caninas e felinas pela técnica EDXRF, número de amostras que apresentam tais elementos e contagens obtidas.	66
4.4	Estatística descritiva das variáveis, inferidas das 65 rações caninas.	71
4.5	Coeficientes de correlação entre as variáveis das rações caninas, cujos valores em negritos correspondem às correlações mais altas.	72
4.6	Componentes principais obtidas da matriz de correlação (TAB. 4.5), por meio do cálculo de seus autovetores.	74

4.7	Frações absorvidas específicas de diferentes energias nos órgãos alvo, considerando o estômago como um volume fonte gama. Os valores de massa foram calculados pelo MCNP, utilizando os dados de volume e densidade da TAB. 3.4 fornecidos ao programa.	79
4.8	Resultados obtidos da simulação por MCNP e do cálculo da dose absorvida interna, considerando a fonte gama volumétrica (estômago), cujo espectro compreende apenas radionuclídes naturais.	85
4.9	Resultados obtidos da simulação por MCNP e do cálculo da dose absorvida interna, considerando a fonte gama volumétrica (estômago), cujo espectro compreende radionuclídes naturais e artificiais.	86
A.1	Concentração de atividade A e respectiva incerteza σ (Bq.kg ⁻¹) para cada amostra de ração canina, sendo <i>a</i> para animais adultos, <i>p</i> para filhotes.	99
A.2	Continuação. Concentração de atividade A e respectiva incerteza σ (Bq.kg ⁻¹) para cada amostra de ração canina, sendo <i>a</i> para animais adultos, <i>p</i> para filhotes, <i>s</i> para idosos e <i>w</i> dietética.	100
A.3	Continuação. Concentração de atividade A e respectiva incerteza σ (Bq.kg ⁻¹) para cada amostra de ração canina, sendo <i>a</i> para animais adultos, <i>p</i> para filhotes, <i>s</i> para idosos e <i>w</i> dietética.	101
A.4	Concentração de atividade A e respectiva incerteza σ (Bq.kg ⁻¹) para cada amostra de ração felina, sendo <i>a</i> para animais adultos e <i>p</i> para filhotes.	102
A.5	Massa, concentração de atividade A e respectiva incerteza σ (Bq.kg ⁻¹) para cada amostra de ração canina, sendo <i>a</i> para animais adultos, <i>p</i> para filhotes, <i>s</i> para idosos e <i>w</i> dietética.	103
A.6	Continuação. Massa, concentração de atividade A e respectiva incerteza σ (Bq.kg ⁻¹) para cada amostra de ração canina, sendo <i>a</i> para animais adultos, <i>p</i> para filhotes, <i>s</i> para idosos e <i>w</i> dietética.	104
A.7	Continuação. Massa, concentração de atividade A e respectiva incerteza σ (Bq.kg ⁻¹) para cada amostra de ração canina, sendo <i>a</i> para animais adultos, <i>p</i> para filhotes, <i>s</i> para idosos e <i>w</i> dietética.	105

A.8	Massa, concentração de atividade A e respectiva incerteza σ (Bq.kg^{-1}) para cada amostra de ração felina, sendo a para animais adultos e p para filhotes.	106
A.9	Composição elementar do tecido mole (ICRU, 1992).	114

LISTA DE ABREVIATURAS

ABINPET	Associação Brasileira das Indústrias para Animais Domésticos.
CR	Fator de transferência meio - organismo (<i>Concentration Ratio</i>).
DCF	Fator de conversão de dose (<i>Dose Conversion Factor</i>).
EDXRF	Fluorescência de raios-X por dispersão de energia (<i>Energy Dispersive X-ray Fluorescence</i>).
FWHM	Largura a meia altura (<i>Full Width at Half Maximum</i>).
HPGe	Detector de germânio hiper puro.
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica (<i>International Atomic Energy Agency</i>).
ICRP	Comissão Internacional de Proteção Radiológica (<i>International Commission on Radiological Protection</i>).
MCNP	Código de Monte Carlo para transporte de N -Partículas.
MDA	Atividade mínima detectável (<i>Minimum Detectable Activity</i>).
MIRD	Comitê que investiga métodos de cálculo de doses absorvidas internas(<i>Medical Internal Radiation Dose</i>).
NaI(Tl)	Detector de iodeto de sódio dopado com tálio.
RAP	Animais e Plantas Referência (<i>Reference Animals and Plants</i>).
SDD	Detector semicondutor de silício (<i>Silicon Drift Detector</i>).

INTRODUÇÃO

Todos os seres vivos do planeta estão constantemente expostos a fontes de radiação ionizante, de origem natural e antropogênica. Algumas fontes naturais de radiação datam da origem da Terra, possuindo meias-vidas de bilhões de anos e, por esse motivo, estão presentes no solo, nos materiais de construção, na água, alimentos e também nos seres vivos (UNSCEAR, 2008b).

Os radionuclídeos naturais podem ser divididos em dois grandes grupos, de acordo com sua origem. No primeiro grupo, estão os radionuclídeos cosmogênicos, formados pela interação dos raios cósmicos com a atmosfera terrestre, como por exemplo o ^{14}C e ^7Be . A interação dos raios cósmicos com as partículas presentes na atmosfera terrestre promove uma cascata de partículas secundárias de alta energia, que contribuem para as exposições dos seres vivos. No segundo grupo estão os radionuclídeos que se originaram na formação do planeta, chamados de radionuclídeos terrestres ou radionuclídeos primordiais, com meias vidas longas o suficiente para serem detectados. Estes radionuclídeos estão dispersos em todo meio ambiente, incluindo nos organismos vivos, e são eles: ^{40}K , ^{87}Rb , ^{244}Pu e os radionuclídeos pertencentes a uma das três séries naturais de ^{238}U , ^{235}U ou ^{232}Th (UNSCEAR, 2008a).

As séries radioativas naturais são compostas por vários radionuclídeos de características distintas e, em sua maioria com meias vidas curtas, terminando em um isótopo estável de chumbo, como mostra a FIG. 1.1 (adaptada de IAEA (2014b)). Esses estão amplamente dispersos em todo o meio ambiente e contribuem com a maior parcela das doses absorvidas pelos seres vivos por exposição à fontes naturais de radiação (UNSCEAR, 2008a). Em comum, as séries apresentam isótopos de rádio

e tório, naturalmente encontrados em diversos tipos de formação rochosa, que decaem para o gás nobre radônio.

Figura 1.1: Séries radioativas naturais: ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th . O esquema mostra os elementos que fazem parte de cada série, bem como suas meias vidas (adaptado de IAEA 2014).

Estudos sobre as concentrações de radionuclídeos no meio ambiente e os níveis de exposição a que os seres vivos estão submetidos são os principais focos da Radioproteção Ambiental, a fim de investigar os possíveis riscos que as radiações ionizantes podem

induzir e, quando necessário, elaborar planos de medidas a serem seguidos para minimizar as exposições aos seres vivos e ao meio ambiente.

Nas últimas décadas tem-se observado um crescente interesse nas exposições de plantas e animais às radiações ionizantes. As primeiras publicações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) já vislumbravam a proteção de plantas e animais que fazem parte da cadeia alimentar humana, e que poderiam elevar as doses internas devido suas ingestões pelos seres humanos (ICRP, 1977). No entanto, o que se observa nas publicações mais recentes é uma nova linha filosófica de proteção ao próprio ecossistema, por entender que a proteção radiológica voltada aos seres humanos pode não refletir as necessidades do meio ambiente (ICRP, 2003; UNSCEAR, 2008b), uma vez que os hábitos de vida são diferentes e, principalmente, a radiosensibilidade das diferentes espécies vivas no planeta é distinta.

Os possíveis efeitos biológicos em plantas e animais podem ser estimados a partir dos dados de concentrações de radionuclídeos no meio ambiente e a dosimetria envolvida para o animal ou planta em questão. Devido à extensão de espécies de plantas e animais, a ICRP definiu (ICRP, 2008) um número limitado de organismos referência (*Reference Animals and Plants* – RAP), para que se pudesse relacionar exposição à dose absorvida e consequentemente aos possíveis efeitos da radiação ionizante sobre esses organismos (e àqueles que são da mesma família taxonômica). A lista de RAPs compreende espécies selvagens possivelmente encontradas na maioria dos ecossistemas, não existindo representantes para animais domésticos de criação ou de companhia, como os cães e gatos.

De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias para Animais Domésticos (ABINPET), o Brasil possui a segunda maior população mundial de cães e gatos, com uma estimativa de mais de 52 milhões de cães e mais de 22 milhões de gatos. O país também se destaca pelo expressivo mercado de fabricação de alimentos para animais domésticos, com uma produção estimada de 2,6 milhões de toneladas em 2016, que representa 68% de todo mercado nacional. O Brasil possui o terceiro maior mercado mundial de produtos destinados à animais domésticos, com uma fatia de 5,3% de um total de US\$102 bilhões (ABINPET, 2016).

A composição química e radiométrica das rações produzidas no Brasil já foi estudada, utilizando métodos de espectrometria gama de alta resolução

(CAVALCANTE; PECEQUILO, 2014; CAVALCANTE; PECEQUILO, 2015) e análise por ativação neutrônica (ELIAS et al., 2012). As farinhas e os fosfatos são as principais fontes de proteína, cálcio e potássio das rações (essenciais na alimentação de cães e gatos), que possuem em sua composição concentrações significativas de radionuclídeos das séries naturais (CASACUBERTA et al., 2009; DESIDERI et al., 2014). Faz-se necessário avaliar a composição desses alimentos, visto que sua produção é mundialmente expressiva e inferir as doses absorvidas por ingestão dos mesmos, que só poderá ser feita a partir de um modelo dosimétrico adequado.

Para avaliar os possíveis riscos associados à ingestão de radionuclídeos por cães, é necessário avaliar os níveis de dose absorvida interna por esses animais. As doses devido à ingestão e inalação são inferidas de modelos dosimétricos que levam em conta, por exemplo, o material alvo, o tipo de radiação envolvida e sua energia. Para construção desses modelos, a ICRP sugere a utilização do código de Monte Carlo para simular geometrias esféricas e elipsoides para representação do corpo do animal ou planta em estudo (TARANENKO et al., 2004; ULANOVSKY; PRöHL, 2006; GOMEZ-ROS et al., 2008; ICRP, 2008; UNSCEAR, 2008b), sem distinção de órgãos ou tecidos e consideram que os radionuclídeos estão homogeneamente dispersos dentro do volume da esfera ou elipse.

Justificativa

A exposição aos radionuclídeos de origem natural é uma condição própria de todos os seres vivos, e talvez necessária para sua existência (CASTILLO et al., 2015), uma vez que estão amplamente dispersos na natureza e podem assim ser encontrados nos alimentos destinados à animais. Até o momento, os estudos que envolvem rações para cães e gatos (cujo mercado é expressivo por sua demanda e produção nacional) tiveram por objetivo avaliar a composição nutricional (ELIAS, 2015) e verificação dos rótulos (CARCIOFI et al., 2006). A radioatividade nesses alimentos é desconsiderado na literatura, conseqüentemente as doses absorvidas internas por sua ingestão também são desconhecidas. Assim, pela primeira vez, o presente trabalho avalia as concentrações de atividade dos radionuclídeos das séries naturais em rações

comerciais para cães e gatos, investigando também as doses internas associadas à suas ingestões.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem por principal objetivo determinar os níveis de radioatividade presentes em rações para cães e gatos comercializadas na cidade de São Paulo e investigar os possíveis riscos aos animais que as consomem. Para que seja alcançado, tal escopo permeou os seguintes objetivos específicos:

- Determinação das concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais e artificiais presentes em rações caninas e felinas, utilizando a espectrometria gama de alta resolução;
- Verificação da presença de outros elementos (metais e não metais) utilizando a técnica de fluorescência de raios-X por dispersão de energia;
- Determinação das possíveis correlações existentes entre os radionuclídeos (utilizando a técnica de espectrometria gama) e as contagens dos outros elementos (utilizando a técnica de fluorescência de raios-X por dispersão de energia), utilizando dois métodos de estatística multivariada: análise de agrupamento e análise das componentes principais;
- Construção de um modelo dosimétrico inédito adequado a um cão, utilizando o código de Monte Carlo;
- Cálculo das doses absorvidas pela exposição interna (via ingestão) dos radionuclídeos presentes nas rações.

Assim, esta tese foi dividida nos seguintes capítulos: no **Capítulo 2** tem-se as noções teóricas ligadas à espectrometria gama, dosimetria para plantas e animais e utilização do código em Monte Carlo MCNP; no **Capítulo 3** tem-se os materiais e métodos envolvidos para desenvolvimento do trabalho; no **Capítulo 4** são apresentados os resultados obtidos com a técnica radiométrica, por fluorescência de raios-X e com a simulação Monte Carlo e, finalmente, no **Capítulo 5** são apresentadas as conclusões pertinentes.

ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Interação da radiação eletromagnética com a matéria

A radiação ionizante interage com a matéria de diferentes formas, dependendo principalmente da energia dos fótons incidentes e do material com o qual ela irá interagir. Do ponto de vista do feixe de radiação, os fótons podem sofrer efeitos de absorção total ou espalhamento (elástico ou inelástico); do ponto de vista do material alvo, efeitos de ionização dos átomos podem ser observados, onde as partículas carregadas liberadas no material promoverão a absorção de energia da radiação incidente. Dentro do espectro de energia dos radionuclídeos naturais e artificiais estudados neste trabalho, os principais efeitos observados são: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares, cujas probabilidades de ocorrência, no cristal de germânio do detector, são apresentadas na FIG. 2.1 (NIST, 2016).

No *efeito fotoelétrico*, um fóton incidente interage com um elétron ligado na eletrosfera de um átomo. O resultado dessa interação é a absorção total da energia do fóton pelo elétron, que é ejetado de sua órbita com uma energia cinética (E_c), numericamente igual (equação 2.1) à diferença das energias do fóton incidente ($h\nu$) e da energia de ligação do elétron (E_l) (ATTIX, 1986; PODGORSK, 2010).

$$E_c = h\nu - E_l \quad (2.1)$$

O elétron ejetado deixa para trás uma vacância na órbita onde estava ligado, promovendo um estado excitado para o átomo. A vacância poderá ser preenchida

Figura 2.1: Coeficiente de atenuação de massa para as interações fotoelétricas, Compton e produção de pares no cristal de germânio.

por outro elétron de uma camada mais externa, sendo a diferença de energia entre as duas órbitas liberada em forma de radiação eletromagnética (raio-X característico) ou transferida a outro elétron (elétron Auger). A probabilidade de interação fotoelétrica (seção de choque para este efeito) é proporcional a $(h\nu)^{-(1-3)}$ do fóton incidente e $Z^{(3-5)}$ do material (ATTIX, 1986), sendo ainda mais predominante para os elétrons das camadas eletrônicas mais internas, onde a energia de ligação com o átomo é maior (PODGORSAK, 2010).

O efeito de absorção parcial da energia do fóton incidente por um elétron fracamente ligado ao átomo (elétron livre) é chamado de espalhamento inelástico, ou *efeito Compton*. Como resultado dessa interação, o fóton perde parte de sua energia (que agora será igual a $h\nu'$) e é espalhado com um ângulo θ em relação à direção do fóton incidente, equação 2.2; o elétron é ejetado e deixa sua órbita com energia cinética E_c e ângulo φ (equação 2.3) (PODGORSAK, 2010).

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

$$E_c = h\nu \frac{(h\nu/m_0c^2)(1 - \cos \theta)}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (2.3)$$

O fóton espalhado pode sofrer processos de absorção, espalhamento ou poderá ainda sair do material sem sofrer nenhuma interação. O elétron ejetado será freado pelo material em inúmeros eventos de ionização e excitação dos átomos, até ser completamente absorvido pelo material. A seção de choque para efeito Compton depende da densidade eletrônica do material alvo e aumenta com a energia do fóton incidente até próximo ao limiar do efeito de produção de pares, para então diminuir com a energia.

O efeito de *produção de pares* é resultado da interação entre o fóton incidente e o campo Coulombiano do núcleo do material alvo, onde é totalmente absorvido e promove a liberação de um par elétron-pósitron com energias cinéticas não necessariamente iguais. Numericamente, essas energias são calculadas pela diferença entre a energia do fóton incidente ($h\nu$) e a energia limiar necessária para a ocorrência deste efeito (igual a 1,022 MeV), cuja seção de choque depende de Z^2 . As duas partículas formadas neste evento podem adquirir energia cinética suficiente para ionizar outros átomos no material, até serem completamente absorvidos no meio. O pósitron, ao interagir com um elétron livre do material, sofre processo de aniquilação, com conseguinte emissão de dois fótons de 0,511 MeV cada (ATTIX, 1986; PODGORSK, 2010).

2.2 Espectrometria gama utilizando detector de germânio hiper puro

A medida da radiação ionizante é possível a partir do uso de materiais que interajam com os fótons ou partículas incidentes, produzindo cargas elétricas ou fótons de luz, que são coletados e mensurados. Os detectores de estado sólido, como os semicondutores, apresentam algumas vantagens sobre os detectores a gás e cintiladores: sua alta densidade (comparado à detectores a gás) permite detecção de elétrons e fótons de alta energia em equipamentos de dimensões menores; maior formação de pares de íons decorrentes da interação fóton-cristal (comparado a detectores cintiladores), o que resulta em maior resolução de energia (KNOLL, 2000).

O germânio é um sólido cristalino do tipo covalente com 4 elétrons em sua camada eletrônica mais externa, ou seja, os átomos se agrupam de forma periódica formando uma rede cúbica e compartilham elétrons de valência entre si. Na ausência

de energia térmica, o número de elétrons do cristal é suficiente para ocupar todos os níveis eletrônicos disponíveis e assim, o cristal não apresenta nenhuma corrente elétrica. No entanto, temperaturas acima de zero graus celsius são suficientes para que elétrons possam ganhar energia térmica para quebrar a ligação covalente entre átomos (deixando um “buraco” em seu lugar) e saltar da banda de valência (banda com elétrons ligados pela energia covalente) sobre a banda proibida (região onde não existem níveis de energia eletrônicos) para uma banda de condução (banda vazia, onde os elétrons estão livres para viajar pelo cristal) (EISBERG; RESNICK, 1979).

A medida de fótons utilizando um detector semiconductor requer cristais com volumes grandes o suficientes para detectá-los. Esta condição pode ser atingida utilizando cristais de alta pureza e os detectores que os empregam são chamados de detectores de germânio hiper puro (HPGe). Estes cristais passam por repetidos processos de purificação para remoção de impurezas até que seu nível seja o menor possível; a impureza restante nestes materiais pode ser do tipo receptora (contato tipo p) ou doadora (n) de elétrons. O cristal é posicionado entre dois eletrodos e um campo elétrico externo é aplicado ao sistema de forma a promover uma polarização reversa; a região entre os contatos p e n tem alta resistividade e não conduz corrente elétrica significativa (KNOLL, 2000).

A incidência de fótons na região do cristal, promove efeitos de ionização (como o efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares), com conseguinte emissão de partículas carregadas livres. Ao longo da trajetória desta partícula carregada, serão produzidos pares elétron-buraco que, sob influência do campo elétrico, se deslocam e são coletados pelos eletrodos, produzindo sinal elétrico. O volume ativo do cristal é a região entre os eletrodos, onde serão produzidas cargas elétricas. No entanto, os contatos p e n podem ter espessuras suficientes para atenuar fótons com energias menores que 200 keV (KNOLL, 2000), atuando como uma “camada morta” na superfície do cristal. Por isso, alguns detectores possuem uma fina janela de entrada, a qual aumenta a faixa de energia possível de ser detectada (KNOLL, 2000; CANBERRA, 2016). Na FIG. 2.2, tem-se uma ilustração do cristal em uma configuração coaxial.

O sinal elétrico gerado pela radiação ionizante é reconhecido por um sistema de pré-amplificação, que converte as cargas elétricas produzidas em pulsos com amplitudes proporcionais à carga total produzida. Em uma próxima etapa, o pulso elétrico passa

Figura 2.2: Esquema ilustrativo de um cristal de germânio em configuração coaxial, com contato tipo n na superfície externa ao cristal e janela de entrada (figuras adaptadas de Knoll (2000) e ficha técnica de detectores HPGe Canberra).

por outro sistema de amplificação (que aumenta a altura do pulso) para então ser registrado no analisador multicanal. O diagrama de blocos do sistema de detecção para espectrometria gama é mostrado na FIG. 2.3.

Figura 2.3: Diagrama de blocos de um sistema de detecção para espectrometria gama com configuração vertical: cargas elétricas são produzidas na interação da radiação com o volume ativo do cristal, são processadas pelo pré amplificador e registradas pelo analisador multicanal.

Em semicondutores, a banda proibida é de baixa energia (menor ou igual a 1eV), sendo igual a 1,115 eV e 0,665 eV respectivamente para Si e Ge a 300 K; 1,165eV e 0,764 eV a 0 K (KNOLL, 2000). Com uma banda proibida de baixo intervalo de energia, pode-se esperar que, mesmo em baixas temperaturas, os elétrons ainda recebam energia térmica suficiente para migrarem à banda de condução. Dessa forma, faz-se necessário manter o detector em baixas temperaturas por meio de contato térmico

com um reservatório de nitrogênio líquido.

A formação do espectro gama se dá pelas interações dos fótons primários com o cristal de germânio, segundo interações fotoelétricas, espalhamento Compton e produção de pares. Quando a interação é do tipo fotoelétrica, o elétron ejetado carrega toda a informação da radiação incidente, formando um pulso chamado de pico de absorção total, adequado para identificação do radionuclídeo presente na amostra (FIG. 2.4 A).

Dependendo de sua energia, o fóton incidente também pode ser espalhado, em ângulos de 0 a π , o que resulta em transferências parciais de energia ao elétron ionizado. De acordo com as equações 2.2 e 2.3, a energia transferida ao elétron será mínima para fótons espalhados em ângulos quase nulos e será máxima em “choques” frontais, onde o ângulo do fóton espalhado é aproximadamente igual a π . Uma vez que todos os ângulos de espalhamento (entre 0 e π) são possíveis, o espectro gama apresenta uma região de espalhamento chamada de Compton contínuo, cujo final é caracterizado por um “degrau”, chamado de degrau ou joelho Compton (FIG. 2.4 B). O fóton espalhando pode ainda ser totalmente absorvido pelo cristal, contribuindo para o pico de absorção total.

Fótons de energias maiores que 1,022 MeV são passíveis de originar um par elétron-pósitron ao interagirem com o detector. Nestes casos, o elétron será totalmente absorvido no cristal e o pósitron será aniquilado promovendo a emissão de dois fótons de 0,511 MeV, onde três situações particulares são observadas (FIG. 2.4 C): escape dos dois fótons, que aparecerá no espectro gama como um pico de energia igual a $h\nu - 1,022$ MeV (pico de escape duplo); escape de um fóton, que será observado no espectro por um pico de $h\nu - 0,511$ MeV (pico de escape simples) e absorção total dos dois fótons, que aparecerá no espectro como pico de absorção total (KNOLL, 2000).

A espectrometria gama utilizando HPGe é uma técnica não destrutiva que possui excelente resolução de energia, que pode ser definida como a medida de resposta do detector à uma determinada energia, influenciada pela: eficiência de coleta de carga, ruído eletrônico e dispersão estatística do número de pares elétron-buraco (KNOLL, 2000). Na prática, a resolução é medida pela dispersão de um pico de energia, dada pela largura à meia altura (FWHM) do pico em questão.

A eficiência de contagem do detector é definida como sendo o número de fótons

Figura 2.4: Ilustração de um espectro gama em função das interações fotoelétricas, Compton e produção de pares, com formação de picos de absorção total (a), Compton contínuo (b) e picos de escape duplo e simples (c).

emitidos pela fonte de radiação que são efetivamente registrados, que depende de fatores como: energia dos fótons emitidos, composição, densidade e tamanho da amostra. Normalmente, a eficiência do detector apresentada pelo fabricante é relativa a um detector de iodeto de sódio dopado com tálio (NaI(Tl)), já que a seção de choque para efeito fotoelétrico neste detector é cerca de 10 a 20 vezes maior, tornando sua eficiência superior.

Na espectrometria gama, assim como em outros sistemas de contagem, pode ser importante a verificação dos valores mínimos detectáveis pelo sistema, chamado por Knoll (2000) de N_D , para cada radionuclídeo de interesse. De acordo com o autor, a amostra terá atividade mensurável caso N_D seja maior que um nível crítico (L_c). A escolha desse nível requer atenção; deve ser alto o suficiente para minimizar a probabilidade de se contar um evento quando ele não existe na realidade (devido às flutuações estatísticas do sistema de contagem), mas também deve ser baixo o suficiente para reduzir as chances de perder contagens reais. O autor mostra que, impondo um L_c para que as chances de se ter falsos positivos e falsos negativos sejam menores que 5%, o valor mínimo detectável N_D tem de ser igual a $4,653 \cdot \sqrt{B}$, onde B representa a contagem de fundo do equipamento.

2.3 Proteção radiológica voltada a plantas e animais

Até 1977, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 1977) e outros órgãos internacionais acreditavam que as recomendações sugeridas para a proteção do homem asseguravam que outras espécies de fauna e flora estariam também protegidas. Os estudos voltados à avaliação de dose absorvida por plantas e animais consideravam estas espécies como parte da cadeia alimentar humana, que poderia levar a exposições internas por ingestão.

Entretanto, nas últimas décadas, têm se observado um crescente número de trabalhos que tratam dos riscos e efeitos biológicos em plantas e animais, pela exposição à radiação ionizante. Como observado no relatório da UNSCEAR (2008b), isto se deve não apenas pela preocupação em proteger habitats e ecossistemas, como também pelo reconhecimento das diferenças entre as exposições do homem e dos outros seres vivos.

Assim, desde 1991 a ICRP tem reformulado suas recomendações acerca da radioproteção voltada à plantas e animais. Nos relatórios de 1991 e 2003 (ICRP, 1991; ICRP, 2003) a comissão afirma a necessidade de proteção do meio ambiente; na publicação de 2007 (ICRP, 2007), que é uma revisão do relatório de 1991, a comissão define o conceito de animal de referência (RAP). A publicação de 2008 (ICRP, 2008) apresenta os métodos de cálculo de dose para a plantas e animais, assim como os possíveis efeitos da radiação nestes organismos. No ano seguinte (ICRP, 2009), foi feita uma revisão dos valores de transferência meio - organismo e finalmente, a imersão do sistema de proteção à biota dentro do sistema de radioproteção da Comissão foi descrita em seu último relatório de recomendações em 2014 (ICRP, 2014).

A radioproteção voltada a seres humanos é norteada por princípios e boas práticas, de forma a evitar o surgimento de efeitos determinísticos¹ e diminuir a probabilidade de ocorrer efeitos estocásticos² para cada indivíduo (ICRP, 2007). O objetivo da radioproteção voltada a plantas e animais, como definido pela ICRP (2014), é de prevenir ou reduzir a frequência de efeitos deletérios, a níveis cujos impactos não seriam significativos à manutenção da diversidade biológica, conservação das espécies

¹Dano celular caracterizado por um limiar de dose absorvida, cuja severidade aumenta com o aumento da dose.

²Efeitos biológicos observados sem limiar de dose absorvida, cuja probabilidade de ocorrência aumenta com o aumento da dose.

e à saúde dos habitats naturais, comunidades e ecossistemas. É, portanto, uma ciência voltada à população e seu ecossistema como um todo, contrariamente à proposta voltada aos seres humanos, que os percebem como indivíduos.

2.4 Conceitos Dosimétricos

A grandeza fundamental em dosimetria das radiações é a dose absorvida (cuja unidade é o gray, Gy), que quantifica a energia depositada em um material, pela exposição à radiação ionizante, por unidade de massa deste (ICRU, 1992). Se o material alvo for um tecido biológico, os efeitos observados de sua interação com a radiação ionizante dependerão da radiosensibilidade do tecido e do poder de ionização da radiação envolvida. Assim, na radioproteção voltada a seres humanos, utilizam-se grandezas derivadas da dose absorvida que levam em conta a resposta dos tecidos aos diferentes tipos de radiação (ICRP, 2007).

Para a ICRP, a grandeza fundamental em proteção radiológica é a dose efetiva (cuja unidade é o sievert, Sv), calculada pela somatória das doses absorvidas ponderadas pelo tipo de radiação e radiosensibilidade dos diferentes tipos de tecido (ICRP, 2007). Esta grandeza incorpora as exposições de um indivíduo (por fontes internas e externas ao seu organismo) e pode ser inferida, na prática, aliando medidas da dose absorvida aos coeficientes de dose (ICRP, 2012) para exposições internas e externas.

Exposições internas são aquelas em que a fonte de radiação foi ingerida, inalada ou injetada no organismo; a região que contém os radionuclídeos é chamada de região fonte (que pode ser um tecido, órgão, conteúdo gastrointestinal ou superfícies dos tecidos) e a seção exposta à radiação é chamada de região alvo (ICRP, 2012). A dosimetria envolvida neste tipo de exposição tem sido aprimorada pelo MIRD (*Medical Internal Radiation Dose*, comitê formado dentro da Sociedade de Medicina Nuclear), cujo formalismo envolve a determinação das frações absorvida nos volumes de interesse.

A fração absorvida é uma grandeza valiosa no estudo das doses absorvidas internas por ingestão de alimentos contaminados por radionuclídeos, sendo frequentemente calculadas pelo método de Monte Carlo. Esta grandeza prediz a fração de energia emitida por uma fonte que é absorvida por um material alvo (ATTIX,

1986; ICRP, 2008). Atualmente, vários métodos para o cálculo das doses absorvidas internas por ingestão foram explorados e podem ser encontradas na literatura para seres humanos. Encontram-se em fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento, métodos de cálculo de dose para plantas e animais.

Conceito Organismo Referência (RAP)

Na interação da radiação com o material alvo, parte da energia carregada pela radiação poderá ser cedida aos elétrons desse meio que irão, por meio de suas interações, depositá-la no material biológico em questão. Dependendo do tipo de célula e da dose de radiação dada, as células poderão se recuperar por meio de mecanismos de reparo no seu ciclo celular. No entanto, o dano biológico pode não ser reparado durante os ciclos celulares, levando a morte funcional ou reprodutiva daquela célula.

Uma vez que as condições de exposição podem variar, e assim os efeitos biológicos sobre o material seriam diferentes, a ICRP adotou o conceito “pessoa referência” para que pudesse descrever um indivíduo padrão que atua como referência para se relacionar exposição à dose absorvida, e dose absorvida aos efeitos biológicos (ICRP (1977) e mais recentemente em ICRP (2002)). Seguindo o mesmo padrão, a Comissão definiu um número limitado de organismos referência (*Reference Animals and Plants* - RAP), para que pudesse avaliar os efeitos da radiação ionizante sobre estes (ICRP, 2008), por meio de parâmetros de transferência e conversão de dose. Dentre os possíveis efeitos em uma população de planta ou animal referência, são considerados principalmente morbidez precoce e capacidade reprodutiva reduzida.

A lista de RAPs definida pela ICRP envolve espécies selvagens representantes de diversos ecossistemas: das aves, peixes e plantas marinhas e de água doce até vertebrados e invertebrados terrestres, além das plantas terrestres, no entanto, não existem representantes para animais domésticos como cachorro e gato, que tem habitats e comportamentos alimentares distintos.

Dosimetria para plantas e animais

A dosimetria voltada a plantas e animais pode ser feita considerando dois casos de exposição: crônica, em áreas de alta radioatividade natural e nos arredores de

instalações nucleares, cujas concentrações de materiais radioativos são constantes com o tempo; ou em casos de acidente, com liberação de material radioativo no meio ambiente de forma descontrolada. De acordo com o tipo de exposição são utilizados modelos de equilíbrio (primeiro caso) ou dinâmicos (segundo caso), como feito por Müller e Pröhl (1993) e VIVES I BATLLE et al. (2008). Em geral, os modelos que consideram situações de equilíbrio são mais utilizados, por fornecerem resultados mais conservativos (UNSCEAR, 2008b).

Em condições de equilíbrio, as estimativas de concentração de atividade nos organismos expostos à radiação são feitas utilizando dados empíricos de fatores de transferência. O parâmetro CR, do inglês, *Concentration Ratio*, é utilizado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e ICRP para descrever razão entre a concentração de atividade total no organismo (dado em Bq/kg por massa do organismo) e a concentração de atividade no meio (dado em Bq/kg para solo e sedimento, Bq/m³ para ar ou Bq/L para água). A coleção mais atual dos valores de CR foi publicada em um relatório técnico (TRS 479) pela IAEA (2014a)³ para os grupos de organismos referência (RAPs).

A partir dos dados de transferência meio-organismo, as taxas de doses absorvidas internas e externas são inferidas por meio de modelos dosimétricos (dadas em mGy/h). Nesses modelos, são calculados fatores de conversão de dose (DCF, do inglês *Dose Conversion Factor*) que relacionam a taxa de dose absorvida por unidade de concentração de atividade do radionuclídeo relevante no organismo ou no meio, dada em (mGy/dia)/(Bq/kg) (ICRP, 2008; UNSCEAR, 2008b). De forma ilustrativa (FIG. 2.5, adaptada de UNSCEAR (2013)), as doses absorvidas por plantas e animais são calculadas.

³Também disponível on-line em: www.wildlifetransferdatabase.org

Figura 2.5: Esquema para cálculo das doses absorvidas por plantas e animais, considerando os parâmetros de transferência e conversão de dose.

Para o cálculo dos DCFs para exposições internas e externas, leva-se em conta o tipo de organismo referência (mamífero, ave, inseto, planta, entre outros) e a energia da radiação incidente. Um caso simples seria, por exemplo, a exposição por uma fonte monoenergética, cujos valores de DCF seriam calculados, em condição de equilíbrio, da seguinte forma (UNSCEAR, 2008b):

$$DCF_{int} = E \times \phi(E) \quad (2.4)$$

$$DCF_{ext} = E \times (1 - \phi(E)) \quad (2.5)$$

Onde $\phi(E)$ representa a fração absorvida e E é a energia da radiação incidente. Para o cálculo das frações absorvidas, e consequentemente dos dados de DCF, a ICRP recomenda o uso do método de Monte Carlo com geometrias esféricas e cilíndricas para representação do corpo do animal ou planta, sem distinção de órgãos e tecidos (TARANENKO et al., 2004; ULANOVSKY; PRöHL, 2006; ULANOVSKY; PRöHL, 2008; ICRP, 2008; GOMEZ-ROS et al., 2008).

Estudos mais recentes passaram a distinguir órgãos e tecidos a partir da elaboração de modelos dosimétricos mais sofisticados, que permitem maior flexibilidade de posicionamento da fonte de radiação dentro do organismo e possibilitam avaliar as doses absorvidas em órgãos específicos. Esses modelos utilizam imagens acuradas do organismo em estudo (como por exemplo, as imagens obtidas em aparelhos de tomografia) e a sua posterior reconstrução computacional. Atualmente existem modelos para avaliação de dose e risco ambiental para sapos (KINASE, 2008), coelho (CAFFREY et al., 2016), caranguejo (CAFFREY; HIGLEY, 2013), peixe (RUEDIG

et al., 2014), ratos e camundongos (STABIN et al., 2006; PEIXOTO et al., 2008) e dois modelos caninos (PADILLA et al., 2008; KRAMER et al., 2012).

Existem atualmente diferentes modelos computacionais que estimam doses absorvidas por animais e plantas, por exposição interna e externa à radiação (BERESFORD et al., 2008), como por exemplo os modelos ERICA (BROWN et al., 2008), CROM (ROBLES et al., 2016) e RESRAD BIOTA (USDOE, 2002). No Brasil destacam-se os trabalhos de Pereira *et al*, que utilizam uma metodologia para cálculo de dose absorvida baseada no modelo RESRAD (PEREIRA et al., 2008; PEREIRA et al., 2010). Em comum, todos os modelos utilizam organismos referência para representar animais e plantas e calculam as doses absorvidas por meio dos parâmetros CR e DCF.

Embora práticos, os modelos citados não podem ser utilizados para avaliações de doses por cães e gatos, uma vez que: os RAPs representam espécies selvagens, cujo representante de mamífero terrestre (que é o rato) tem hábitos imensamente diferentes de cães e gatos; os valores de CR e DFC são calculados para os animais referência em situação de contaminação ambiental. Para que a metodologia dos modelos computacionais seja utilizada para animais diferentes dos RAPs, é necessário determinar novos valores de CR e DCF, somente possível por meio de experimentação animal.

2.5 Simulação pelo Método de Monte Carlo: MCNP

As principais características do método MCNP descritas a seguir foram baseadas em seu código de transporte (BRIESMEISTER, 2000).

O método de Monte Carlo pode ser descrito como um método estatístico que utiliza números aleatórios para amostrar processos físicos (matematicamente, funções de densidade de probabilidade), como por exemplo seção de choque ou decaimento radioativo. O código **Monte Carlo** utilizado para descrever o transporte de muitas (**N**) **Partículas** (MCNP) simula resultados interessantes, como corrente através de uma superfície, fluxo de partículas ou de energia através de uma superfície, comprimento de caminho de uma partícula e deposição de energia.

De forma ilustrativa (FIG. 2.6), supõe-se alguns eventos para explicar o funcionamento do código (baseado na ilustração descrita em Briesmeister (2000) para

nêutrons):

Figura 2.6: Etapas de possíveis eventos simulados pelo código MCNP, considerando a interação de fótons e elétrons.

- Números de 0 a 1 são selecionados de forma aleatória para determinar qual e onde a interação irá ocorrer baseado nas probabilidades que governam o processo físico em estudo.
- Nesta representação, um fóton com energia maior que 1,022 MeV incide (A) no material alvo.
- Esse fóton interage (B) com o campo coulombiano nuclear de um átomo e é aniquilado, produzindo um par de partículas: um elétron (I) e um pósitron (II).
- A história do fóton incidente termina e a do elétron (I) é temporariamente suspensa para análise futura.
- O pósitron (II) sofre aniquilação (C) emitindo em 180° , um par de fótons com 511 keV cada. A história de um dos fótons é suspensa enquanto o outro fóton, por amostragem aleatória, sofre espalhamento inelástico (D).
- Nessa interação (D), o fóton é espalhado em uma direção aleatoriamente selecionada pela distribuição de probabilidade do efeito Compton e um elétron (III) é ejetado de sua órbita. A história desse elétron é temporariamente suspensa enquanto o fóton, por amostragem aleatória, sai do material alvo e sua história termina.

- O segundo fóton produzido em (C) é retomado e por amostragem aleatória interage com um elétron ligado a um dos átomos do material alvo (E), produzindo um fotoelétron (IV). A estória do fóton termina e as estórias dos elétrons armazenados são retomados.
- Proseguindo com o último elétron suspenso (IV), este perde sua energia em sucessivas interações eletrônicas e nucleares até ser suficientemente freado e capturado por um átomo, terminando sua estória. O mesmo acontece com os elétrons armazenados das outras interações, primeiramente o elétron (III) e depois o elétron (I).
- As grandezas de interesse são contabilizadas (fluxo, corrente, deposição de energia, entre outras).
- Uma nova partícula é selecionada e novas estórias são contabilizadas. Quanto maior o número de partículas iniciais simuladas, melhor será a estatística do evento.
- Para fótons que incidem no material alvo com energias inferiores a 1,022 MeV, a representação dos eventos simulados no MCNP segue a partir de (C), em direção à (D) para efeito Compton e em direção à (E) para efeito fotoelétrico.

O MCNP-4C simula o transporte de fótons e elétrons com energias de 1 keV a 1000 MeV, além de nêutrons de 10^{-11} MeV a 20 MeV. Os tipos de cálculos a serem realizados são chamados de *tally*, especificados pelo usuário por meio de diferentes mnemônicos (F1 - F8), e o resultado final é dado por unidade de partícula primária. Como descrito no manual, a precisão dos resultados está relacionada ao número de eventos simulados e pode ser verificada pelo erro relativo R , apresentado no arquivo de saída do MCNP, que deve ser menor que 10%.

A utilização do método de Monte Carlo foi de suma importância para este trabalho, visto que os *softwares* de análise de risco para plantas e animais existentes (ERICA, CROM por exemplo) utilizam os valores de CR consequentes de contaminações ambientais em água, solo e ar. Para a avaliação das doses absorvidas internas devido à ingestão de alimento contaminado, foi preciso simular as frações

absorvidas pelo organismo, devido à exposição por uma fonte radioativa volumétrica interna.

2.6 Alimentos para animais domésticos

A ração destinada a animais domésticos tem em sua composição uma mistura de ingredientes, que podem incluir subprodutos de origem animal (como por exemplo as farinhas de vísceras, farinhas de pena, farinhas de carne e ossos), de origem vegetal (por exemplo, milho e farelo de soja) e também de origem mineral (cálcio, fósforo, zinco, entre outros). A regulamentação e fiscalização desses produtos são responsabilidade do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que estabelece critérios a serem seguidos: níveis de garantia mínimos de proteína bruta, extrato etéreo e fósforo; além de níveis máximos de umidade, fibra bruta, matéria mineral e cálcio (MAPA, 2003).

Os fabricantes de rações dividem os alimentos em três categorias: econômica, padrão/premium e super premium. Embora não instituída pelo MAPA, as indústrias assim as classificam de acordo com a concentração de nutrientes, qualidade e tipo de matéria prima. Esta segmentação comercial justifica a diferença dos preços das marcas e é normalmente aceita pelos consumidores (CARCIOFI et al., 2006).

Um parâmetro de classificação é o conteúdo protéico das marcas. Nas rações econômicas, são utilizadas como fontes protéicas as farinhas de origem animal de baixa digestibilidade (farinhas de penas, de carne e ossos). As rações intermediárias premium tem melhor digestibilidade para o animal, são utilizados fontes protéicas de melhor qualidade e/ou maior quantidade (de duas a quatro fontes, como por exemplo as farinhas de vísceras, farelo de soja, farelo de glúten, entre outros). As rações super premium tem digestibilidade acima de 80% e são utilizadas farinhas de vísceras e carne de boa qualidade como fontes protéicas (FORTES, 2005a; FORTES, 2005b; CARCIOFI, 2008).

Segundo Carciofi (2016), alguns elementos são essenciais para a nutrição de cães e gatos, como Ca, P, Mg, Na, K, Cl, S (macroelementos) e ainda Fe, Zn, Cu, Mn, I e Se (microelementos). Dentre esses elementos, cálcio, fósforo e magnésio são obtidos principalmente das farinhas de animais desidratados (farinhas de ossos e de vísceras).

Ainda segundo o autor, nas farinhas de carne e ossos é possível encontrar até 15% de cálcio, 10% de fósforo e 2% de magnésio; nas farinhas de vísceras de frango são obtidos até 3% de cálcio e fósforo e até 0,2% de manganês. As farinhas de peixe (até 3%) e ácido fosfórico (até 32%) também são fontes ricas de fósforo. Além das farinhas, cálcio e fósforo são obtidos dos fosfatos de cálcio (até 22%).

Os fosfatos de cálcio são obtidos das rochas fosfáticas, cujas concentrações significativas de radionuclídeos da série do urânio já são conhecidos (FAO, 2004; SAUEIA et al., 2005; CASACUBERTA et al., 2009). Portanto, seu uso em formulações de rações para animais pode aumentar os níveis de radioatividade natural desses alimentos, como mostram os trabalhos de Casacuberta et al. (2010) para rações de frango, Filho et al. (2016) para rações destinadas a bois e frangos e Desideri et al. (2014). No último, rações destinadas a diferentes animais de criação apresentaram níveis de radioatividade natural maiores para aquelas que usam os fosfatos de cálcio em sua formulação, mostrando ainda sua correlação com concentrações maiores de ^{210}Po e ^{40}K .

Ainda que as concentrações de atividade das rações tenham raízes nos fosfatos, pode-se supor que as farinhas derivadas de animais tenham influência nos níveis de radioatividade presentes nesses alimentos. Uma vez que essas farinhas são ricas em cálcio (DEYDIER et al., 2005), cujo comportamento químico é semelhante aos outros elementos da família dos alcalinos terrosos, como por exemplo o rádio, pode-se supor encontrar elementos de sua série natural, ainda que em nível de traços. Elias et al. (2012) e Fernandes et al. (2017) mostram concentrações detectáveis de urânio para algumas marcas de ração canina, com valores máximos de 2,25 mg/kg para rações destinadas a cães adultos e 3,99 mg/kg para rações destinadas a filhotes.

Assim, é possível encontrar na literatura trabalhos que tratam da avaliação dos rótulos das rações para cães e gatos, no que diz respeito às concentrações de elementos, com enfoque à nutrição animal (CARCIOFI et al., 2006) ou que poderiam comprometer a sua saúde (ELIAS, 2015). A avaliação da radioatividade presente nestes alimentos é praticamente desconhecida (salvo os trabalhos de Cavalcante e Pecequilo (2014), Cavalcante e Pecequilo (2015)), por isso faz-se necessário uma investigação radiométrica mais abrangente e suas implicações (como por exemplo as doses absorvidas internas).

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostragem e Preparo

Sessenta e cinco amostras de rações caninas e treze amostras de rações felinas, de diferentes fabricantes, foram adquiridas comercialmente em lojas da cidade de São Paulo (TAB. 3.1 e TAB. 3.2). Os produtos que existem no mercado atualmente diferem em qualidade de matéria prima e concentração de nutrientes (tipo econômico, padrão, premium e super premium) e as marcas podem apresentar produtos distintos (para filhotes, para adultos, sabor carne, dietética, entre outras).

Tabela 3.1: *Identificação das amostras de ração canina adquiridas comercialmente, classificadas pelo fabricante segundo a idade do animal e restrição nutricional.*

Fabricante	Número de marcas				
	Total	Filhote	Adulto	Senior	Dietética
A	5	0	5	0	0
B	11	2	8	1	0
C	4	0	4	0	0
D	2	1	1	0	0
E	1	0	1	0	0
F	3	0	3	0	0
G	7	2	5	0	0
H	5	1	3	1	0
I	3	0	3	0	0
J	1	0	1	0	0
K	2	0	0	1	1
L	5	0	4	1	0
M	2	0	2	0	0
N	2	1	1	0	0
O	3	0	2	1	0
P	4	1	3	0	0
Q	1	0	1	0	0
R	3	0	3	0	0
S	1	0	1	0	0
Total	65	8	51	5	1

Tabela 3.2: *Identificação das amostras de ração felina adquiridas comercialmente, classificadas pelo fabricante segundo a idade do animal e restrição nutricional.*

Fabricante	Número de marcas				
	Total	Filhote	Adulto	Senior	Dietética
A	1	0	1	0	0
B	3	1	2	0	0
E	1	0	1	0	0
F	1	0	1	0	0
G	2	0	2	0	0
H	1	0	1	0	0
I	1	0	1	0	0
L	1	0	1	0	0
S	2	1	1	0	0
Total	13	2	11	0	0

Cada amostra foi triturada mecanicamente em moedor de café, mantida em estufa (de temperatura próxima a 50°C) por 5 dias e então manualmente pulverizada em almofariz de porcelana com pistilo. Uma vez em pó, cada amostra foi acondicionada em frasco de 100 mL de polietileno de alta densidade (PEAD) fechado com batoque, tampa rosqueada e selado com fita isolante. O fechamento adequado dos frascos é uma etapa importante no preparo das amostras, pois diminui as chances de perda do gás radônio, garantindo o equilíbrio radioativo das séries de urânio e tório. O processo de preparo das amostras é mostrado na FIG.3.1, iniciando com os grãos obtidos nas embalagens compradas (a), passando pelo processo de secagem e pulverização (b, c, d) e fechamento dos frascos (e, f).

3.2 Espectrometria Gama

A radioatividade presente nas amostras de ração foi verificada por espectrometria gama passiva de alta resolução. Nesta técnica não destrutiva, as atividades dos radionuclídeos artificiais são inferidas diretamente de suas emissões gama; já os radionuclídeos das séries naturais ^{226}Ra e ^{232}Th , tem suas atividades inferidas em situação de equilíbrio radioativo, a partir das atividades dos núclídeos filhos de maior probabilidade de emissão gama.

Em equilíbrio radioativo secular, que ocorre quando o tempo de meia vida do radionuclídeo filho $(t_{1/2})_f$ é muito menor que a meia vida do radionuclídeo pai $(t_{1/2})_p$, as equações que descrevem o decaimento e formação de núclídeos (equações de Bateman

Figura 3.1: (a) Grãos de ração canina, (b) moedor de café e almofariz de porcelana, (c) estufa para secagem, (d) amostra pulverizada, (e) frasco PEAD (f) frascos PEAD selados e identificados com o nome da amostra, massa e data de selagem.

(EVANS, 1972)) podem ser simplificadas de tal forma que:

$$A_f(t) = A_p(t) \cdot (1 - e^{-\lambda_f \cdot t}) \quad (3.1)$$

$$\lambda_f = \frac{\ln(2)}{(t_{1/2})_f} \quad (3.2)$$

Onde:

A_f : Atividade do radionuclídeo filho [Bq];

A_p : Atividade do radionuclídeo pai [Bq];

λ_f : Constante de decaimento do radionuclídeo filho [s^{-1}]

$(t_{1/2})_f$: Meia vida do radionuclídeo filho;

Neste caso, após um tempo igual a sete meias vidas do radionuclídeo filho, sua atividade será igual a 99,2% da atividade do radionuclídeo pai e, portanto, pode-se

dizer que são iguais. Para atingir tal condição nas séries de rádio e tório avaliadas, foi necessário esperar um tempo mínimo de 28 dias (equivalente a $7 t_{1/2}$ do ^{222}Rn , como pode ser visto na FIG. 1.1) antes de analisar as amostras usando a espectrometria gama.

Os espectros de emissão gama foram obtidos com um detector coaxial de germânio hiperpuro (HPGe) de faixa estendida da Canberra, com eficiência relativa mínima de 40% e resolução de 1,8 keV, medida para a energia de 1332 keV do ^{60}Co (Canberra/XtRa/GX4020), ligado a um conjunto eletrônico convencional com analisador multicanal 4k (EG&G ORTEC/Spectrum Master 920-8). Neste sistema, o cristal está encapsulado sob vácuo em um criostato cilíndrico vertical e isolado do pré amplificador por uma blindagem, conhecida como pescoço de cisne, garantindo baixo nível de radiação de fundo (FIG. 3.2). Além disso, o cristal possui uma janela de entrada fina de carbono (espessura de 0,6 mm), que amplia o espectro para fótons de baixa energia (a partir de 3 keV) (CANBERRA, 2016).

Figura 3.2: (a) Ilustração do sistema de detecção com amostra posicionada sobre o cristal, instalado dentro de uma blindagem de chumbo com baixa radiação de fundo. O sistema é mantido em temperatura baixa por um reservatório de nitrogênio líquido. (b) Foto do sistema e (c) detalhes da blindagem citada e janela de carbono sobre o cristal.

As curvas de eficiência e radiação de fundo do detector foram feitas nas mesmas geometrias das amostras usando, respectivamente, solução radioativa aquosa multielemental e água ultrapura. Essas curvas são verificadas três vezes ao ano por testes de proficiência do Programa Nacional de Intercomparação, realizado pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD – CNEN) (PNI, 2016).

Cada amostra foi medida por um tempo de contagem útil de 150.000 segundos e os espectros obtidos foram analisados com o software InterWinner 6.0 (INTERWINNER, 2004). Os radionuclídeos verificados neste trabalho têm tempos de meias vidas significativamente maiores que o tempo de contagem, ou seja, suas atividades permanecem praticamente constantes durante as avaliações. Dessa forma, a concentração de atividade e incerteza correspondente foram calculadas a partir das equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$A(E) = \frac{C(E)}{P_{\gamma}(E) \cdot \varepsilon(E) \cdot m \cdot t} \quad (3.3)$$

$$\sigma_A = A \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{C(E)}}{C(E)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{P_{\gamma}(E)}}{P_{\gamma}(E)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\varepsilon(E)}}{\varepsilon(E)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2} \quad (3.4)$$

Onde:

- E : energia da transição gama considerada [keV];
- $A(E)$: concentração de atividade do radioisótopo para a transição gama considerada [Bq.kg⁻¹];
- $C(E)$: contagens líquidas na região de interesse [cps];
- $P_{\gamma}(E)$: probabilidade de emissão da transição gama considerada;
- $\varepsilon(E)$: eficiência de detecção para a transição gama considerada;
- m : massa da amostra [kg];
- t : tempo útil de contagem da amostra [s] e
- σ_i : incerteza do i-ésimo termo da equação.

Quando o radionuclídeo de interesse tem somente uma transição gama, a concentração da atividade e sua incerteza são diretamente calculadas pelas equações 3.3 e 3.4. Para radionuclídeos com mais de uma transição, a concentração de atividade e sua incerteza são calculadas respectivamente por meio das equações 3.5 e 3.6, que levam

em conta a média das atividades parciais (calculadas pela equação 3.3) ponderada por suas incertezas.

$$A = \frac{\sum \frac{A_i}{\sigma_i^2}}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (3.5)$$

$$\sigma_A = \frac{1}{\left(\sum \frac{1}{\sigma_i^2}\right)^{1/2}} \quad (3.6)$$

Onde:

A : concentração média da atividade [Bq.kg⁻¹];

A_i : concentração de atividade da i -ésima transição gama detectada [Bq.kg⁻¹];

σ_i : incerteza (equação 3.4) associada à i -ésima transição gama detectada; e

σ_A : incerteza da concentração de atividade média.

Foram investigados os radionuclídeos das séries naturais ²²⁶Ra e ²³²Th, o radionuclídeo ⁴⁰K e os artificiais que normalmente são avaliados em amostras de alimentos para consumo humano (CODEX, 2009; CNEN, 2005): ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ¹⁰⁶Ru, ¹⁰³Ru, ¹³¹I e ²⁴¹Am. Em situação de equilíbrio secular, a atividade de ²²⁶Ra é inferida das atividades de ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi, enquanto a atividade do ²³²Th é inferida das atividades de ²²⁸Ac, ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi. Para cada radionuclídeo, tomou-se as emissões gama de maior intensidade, descritas na TAB. 3.3 (LNHB, 2016). Na FIG. 3.3 tem-se um espectro típico de amostra de ração canina.

Tabela 3.3: Energias e probabilidades de emissão gama dos radionuclídeos naturais e artificiais considerados.

Radionuclídeos naturais				Radionuclídeos artificiais		
		Energia (MeV)	P _γ (%)			
		Energia (MeV)	P _γ (%)			
²²⁶ Ra	²¹⁴ Pb	0, 2952	18	⁶⁰ Co	1, 1732	100
		0, 3519	36		1, 3325	100
	²¹⁴ Bi	0, 6093	45	¹³⁷ Cs	0, 6617	85
		1, 1203	15		¹³¹ I	0, 3645
²³² Th	²¹² Pb	0, 2386	44	¹⁰³ Ru	0, 4971	90
		0, 3001	3	¹⁰⁶ Ru	0, 5119	20
	²¹² Bi	0, 7273	7	²⁴¹ Am	0, 0595	36
	²²⁸ Ac	0, 9111	26			
		0, 9689	16			
⁴⁰ K		1, 4608	11

Figura 3.3: Espectro bruto de uma amostra de ração canina (durante 150.000 s) e identificação dos picos de emissão gama dos radionuclídeos naturais de interesse nas rações avaliadas.

Em análises espectrométricas, é comum a análise de auto atenuação das emissões gama pela própria amostra, especialmente naquelas com densidades maiores que da água (matriz utilizada para determinação de eficiência e radiação de fundo, cuja densidade é aproximadamente igual a 1,0 g/cm³). No entanto, as amostras de ração apresentam densidade aparente média igual a 0,72 g/cm³ (variando de 0,66 a 0,76 g/cm³) para as rações felinas e 0,71 g/cm³ (variando de 0,53 a 0,83 g/cm³) para as rações caninas, portanto não requerendo correção por auto atenuação.

A atividade mínima detectável (MDA) depende da amostra a ser analisada e foi calculada pelo *software* InterWinner para cada amostra, utilizando o nível crítico (descrito nos aspectos teóricos, item 2.2) e a equação de concentração de atividade:

$$MDA(E) = \frac{N_D}{P_\gamma(E) \cdot \varepsilon(E) \cdot m \cdot t} = \frac{4,653 \cdot \sqrt{B}}{P_\gamma(E) \cdot \varepsilon(E) \cdot m \cdot t} \quad (3.7)$$

Onde:

MDA : atividade mínima detectável [Bq.kg⁻¹];

N_D : contagem mínima detectável [cps]

$P_\gamma(E)$: probabilidade de emissão da transição gama considerada;

$\varepsilon(E)$: eficiência de detecção para a transição gama considerada;

m : massa da amostra [kg];

t : tempo útil de contagem da amostra [s] e

B : contagem de fundo do equipamento.

3.3 Fluorescência de Raios-X

A presença de alguns radionuclídeos pode estar associada às fontes minerais empregados na fabricação das rações, tais como as farinhas de carne e ossos e fosfatos de cálcio. Para verificar a presença de metais e outros elementos nas amostras, e possivelmente relacioná-las às concentrações dos radionuclídeos analisados, foi utilizada a técnica de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (EDXRF).

A técnica consiste em excitar uma amostra com um feixe de fótons ou partículas aceleradas, promovendo a ionização dos átomos. As lacunas dos elétrons ejetados são imediatamente ocupadas por elétrons de órbitas mais externas ao núcleo com emissão de fótons de raios-X característicos, cujas intensidades (número de contagens)

são proporcionais à concentração do elemento na amostra. Um detector acoplado ao sistema (como por exemplo, o semicondutor de silício) produz sinais elétricos referentes aos fótons incidentes, cujas energias são discriminadas por um analisador multicanal. Esta é uma técnica não destrutiva e permite avaliar múltiplos elementos químicos em uma única análise, características úteis para este estudo (FILHO, 1999).

As amostras de ração foram avaliadas pela técnica EDXRF, utilizando um sistema portátil do Departamento de Física Nuclear do Instituto de Física da USP, composto por: um tubo de raios-X com anodo de prata (Amptek/Mini X), detector semicondutor *Silicon Drift Detector* (SDD) de 25 mm² x 500 μ m, janela de berílio (Amptek/XR-100CR) e analisador multicanal com fonte de tensão (Amptek/PX5). As características desse sistema estão descritas em (CAMPOS, 2015; ZAMBONI et al., 2015). A tensão e corrente no tubo foram fixadas em 30 kV e 15 μ A, respectivamente, e o tempo de exposição de cada amostra foi de 300 segundos. A FIG. 3.4 mostra o esquema experimental utilizado e a FIG. 3.5 apresenta o espectro obtido da amostra de ração canina Oa01, observado no *software* de análise WinQxas (WINQXAS, 2002).

Figura 3.4: Esquema experimental utilizando o detector Amptek/Mini X para análise por fluorescência de raios-X. O feixe de fótons do tubo de raios-X (B) excita a amostra (A), cuja emissão de raios-X característicos é detectada pelo detector semicondutor SDD (C).

Figura 3.5: Espectro da amostra de ração canina Oa01, observado por meio do software de análise WinQxas (WINQXAS, 2002).

3.4 Simulação pelo método de Monte Carlo

Para avaliar os níveis de dose absorvida interna por cães (D_i), utilizou-se o código Monte Carlo MCNP-4C (BRIESMEISTER, 2000) para calcular a dose absorvida interna (D_i) em alguns órgãos alvo, utilizando um modelo dosimétrico simples que representa um cão adulto. A simulação que utiliza o MCNP-4C requer um arquivo de entrada em três blocos, que descrevem: geometrias e materiais utilizados; posição e características da fonte de radiação ionizante e grandeza alvo desejada (chamada *tally*), como por exemplo, fluxo de partículas, energia depositada em um volume, entre outras (descrito no item 2.5).

3.4.1 Geometrias e materiais

Para a construção da geometria utilizada no cálculo do MCNP, utilizou-se um estudo publicado por Padilla et al. (2008). Neste estudo, os autores desenvolveram um objeto simulador canino em 3 dimensões, a partir da reconstrução tomográfica de um cão adulto de 26 kg e apresentam dados de volume e massa de diversos órgãos. Tomando-se os dados de volume de alguns órgãos selecionados, construiu-se geometrias simplificadas (elipses, esferas e cilindros) com o mesmo volume publicado por Padilla et

al. (2008) de órgãos caninos e, aplicando a equação correspondente à figura geométrica escolhida para cada órgão, inferiu-se as dimensões apropriadas. Por exemplo, sendo o volume descrito pelos autores para o fígado igual a $680,58 \text{ cm}^3$ e escolhendo uma esfera para representá-lo, calculou-se o valor do raio da esfera como sendo igual a 5,4 cm.

Com relação aos materiais, utilizou-se a composição dos tecidos descritos pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas da Radiação (ICRU, 1992) para o organismo humano (**Anexo A**), uma vez que não foram encontradas descrições específicas da composição de tecido canino na literatura. Estes valores podem não corresponder à realidade da composição de órgãos caninos, no entanto, estudos sugerem semelhanças significativas entre homens e cães, no que diz respeito a genética (STARKEY et al., 2005), morfologia e esvaziamento gástrico (WELLING, 1991; KARARLI, 1995). As geometrias utilizadas bem como os materiais empregados são apresentados na TAB 3.4.

Tabela 3.4: Descrição das geometrias e composição biológica dos volumes alvo para o modelo canino.

Órgão	Volume (cm^3)	Figura geométrica	Dimensão (cm) ¹			Material	Densidade ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
			x	y	z		
Estômago	310,3	Esfera	4,2	4,2	4,2	Tecido mole	$1,04^2$
Fígado	659,6	Esfera	5,4	5,4	5,4	Fígado	$1,06^2$
Intestino	507,3	Cilindro	19,2	2,9		Trato G.I.	$1,03^2$
Pâncreas	2,1	Esfera	0,8	0,8	0,8	Pâncreas	$1,04^2$
Ovário (D/E)	0,9	Esfera	0,6	0,6	0,6	Ovário	$1,05^2$
Pulmão (D/E)	879,0	Elipsóide	4,7	19	4,7	Pulmão	$0,260^2$
Coração	237,2	Elipsóide	3,3	5,2	3,3	Coração	$1,04^2$
Superfície	20718,0	Elipsóide	15,2	25	15,2	Tecido mole	$1,04^2$
Ar	$5,2 \cdot 10^8$	Esfera	500	500	500	Ar seco	$1,2048 \cdot 10^{-3}^3$

¹Para todas as esferas, as dimensões são referentes ao raio e nas elipses aos semi-eixos. No cilindro, as dimensões são referentes à altura (eixo x) e raio (eixo y).

²De acordo com ICRU 46 (ICRU, 1992).

³De acordo com NIST (NIST, 2015).

3.4.2 Fonte de radiação e *tally*

O MCNP permite simular quatro tipos diferentes de fontes de radiação ionizante, partindo de um mnemônico associado: fontes genéricas (SDEF), fontes de superfície (SSR), fontes críticas (KCODE) e fontes definidas pelo usuário. A fonte de radiação também deve definir algumas variáveis, tais como: tipo e energia da radiação a ser simulada, sua direção de voo, local de origem (célula ou superfície) e peso estatístico (BRIESMEISTER, 2000).

As rações caninas e felinas avaliadas apresentaram espectros de emissão gama, cujas energias estão descritas na TAB 3.3 e, uma vez ingeridos, esses alimentos se tornam fontes de radiação internas ao organismo dos animais. Durante sua digestão, o alimento passa por alguns órgãos e os radionuclídeos são, em parte absorvidos pelo trato gastrointestinal e em parte excretados junto com o resíduo da digestão. Portanto, durante a digestão do alimento, pode-se dizer que alguns órgãos se tornam fontes volumétricas de radiação ionizante. Sabendo que o tempo de residência do alimento no estômago é de algumas horas, tomou-se esse órgão como fonte de radiação para a simulação, que foi inserido no código MCNP da seguinte forma:

```

mode p e
SDEF pos 0 0 0 cell=10
rad=d1 SI1 H 0 4,2 SP1 -21 2
erg=d2
SI2 SP2
L D
0.23863 0.4360
0.29522 0.1841
0.30009 0.0318
0.35193 0.3560
0.60931 0.4549
0.72733 0.0665
0.91120 0.2620
0.96896 0.1590
1.12029 0.1491
1.46082 0.1055

```

O comando *mode p e* simula o transporte de fótons e dos elétrons secundários criados; *SDEF* descreve o tipo de fonte; *pos 0 0 0* é a coordenada de origem (x,y,z) das partículas geradas; *cel=10* é a unidade volumétrica de origem das partículas

(órgão fonte: estômago = 10); $rad=d1$ corresponde à uma fonte esférica, cujo raio obedece $SI1$ e, neste caso, é igual a 4,2 cm (raio do estômago); $SP1 -21$ 2 considera distribuição homogênea de partículas no volume da esfera; $erg=d2$ descreve o espectro gama obtido, cujas energias discretas (L) obedecem aos valores descritos em $SI2$ e respectivas probabilidades (D) descritas em $SP2$.

A grandeza a ser encontrada é a dose absorvida interna nos órgãos alvo e restante do corpo do animal. Para isso, utilizou-se o *tally *F8*, que calcula a energia depositada por fótons e elétrons em uma unidade de volume. Para o cálculo, o MCNP acompanha o trajeto de uma partícula e, para cada volume em que ela atravessa, faz a diferença entre a energia de entrada no volume e energia de saída. Assim, o resultado final da simulação é a energia depositada (na unidade MeV) por 1 fóton em cada volume alvo.

Para o cálculo da dose absorvida interna D em uma região alvo (r_a), por exposição a um material radioativo uniformemente distribuído em uma fonte volumétrica r_f , utilizou-se a equação 3.8, baseada na metodologia descrita pelo MIRD (BOLCH et al., 2009):

$$D(r_a) = \frac{\sum_i A_i(r_f) \cdot n_i(r_f) \cdot E_i(r_f) \cdot \phi_i(r_a)}{m(r_a)} \quad (3.8)$$

Onde:

$D(r_a)$: Dose absorvida interna na região alvo r_a ;

$A_i(r_f)$: concentração de atividade na amostra [$Bq \cdot kg^{-1}$] do radionuclídeo de energia i

$n_i(r_f)$: número de partículas (fótons) com energia i , emitidas por desintegração radioativa [$partículas/decaimento^{-1}$];

$E_i(r_f)$: energia do i -ésimo fóton [MeV];

$\phi_i(r_a)$: fração absorvida para o i -ésimo fóton;

$m(r_a)$: massa do volume alvo [kg].

A fração absorvida é definida como a fração de energia emitida por uma fonte que é absorvida por um material alvo (ATTIX, 1986), e pode ser inferida do arquivo de saída do MCNP como sendo $\phi_i = *F8/E_i$. O número de fótons emitidos por desintegração radioativa é geralmente apresentado nas tabelas de radionuclídeos para 100 transformações (LNHB, 2016) e, para o espectro de energias dos radionuclídeos naturais considerados neste trabalho, somam 2,21 fótons por transformação nuclear.

Finalmente, foi considerada a atividade total da amostra, que é soma de todas as atividades dos radionuclídeos detectados na espectrometria gama.

Dessa forma, o cálculo final das doses internas seguiu a expressão 3.9, que leva em conta também a quantidade de alimento ingerido durante 1 dia (média de 0,6 kg por dia para um cão de 26 kg, seguindo recomendação dos fabricantes de ração) e o fator $1,602.10^{-13}$ para converter o resultado em $\text{MeV.kg}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, para $\text{J.kg}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ [Gy.dia^{-1}].

$$D(r_a) = \frac{A_t(r_f).2,21.*F8}{m(r_a)}.1,602.10^{-13}.0,6 \quad (3.9)$$

Onde:

$D(r_a)$: Dose absorvida interna na região alvo r_a ;

$A_t(r_f)$: atividade total da amostra, distribuída no volume r_f ;

2,21 : Número de fótons por transformação nuclear, considerando o espectro de radionuclídeos naturais;

*F8 : energia depositada por fótons e elétrons em uma unidade de volume;

$m(r_a)$: massa do volume alvo [kg].

Embora a ICRP forneça parâmetros para conversão de dose tecido-corpo total, seria necessário ter informações sobre as concentrações de atividade em algum tecido do corpo animal, cuja medida só é possível por meio de experimentação animal. Por este motivo, as doses internas foram inferidas utilizando o formalismo do MIRD.

No presente estudo não se considerou a biocinética e o tempo de residência dos elementos no organismo do animal, visto que, até o presente momento, não existem estudos específicos para os radionuclídeos naturais de chumbo, bismuto e actínio em ração, ingeridos por cães e gatos. Dessa forma, foi suposta uma situação irreal e mais conservadora possível, onde todos os radionuclídeos são integralmente absorvidos pelo animal em todas as refeições, desconsiderando-se as frações eliminadas pelos animais.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Espectrometria Gama

Cada amostra de ração canina foi renomeada de acordo com seu fabricante (letras maiúsculas A - S) e produto (letras minúsculas), representando rações tipo “a” para adulto, “p” para filhote, “s” para senior e “w” para dietética. As amostras de ração felina seguiram a mesma nomenclatura e são diferenciadas com a letra “f”.

4.1.1 Escolha do Tempo de Contagem

A concentração de atividade presente em uma amostra pode ser quantificada, para fótons gama, utilizando a equação 3.4 (item 3.2). Esta equação leva em conta não apenas o tipo de radionuclídeo a ser avaliado (descrito por sua probabilidade de transição), como também parâmetros do sistema de contagem, tais como a geometria do frasco contendo a amostra, a blindagem contra radiação de fundo e o sistema eletrônico (propriedades incorporadas no levantamento da curva de eficiência do detector).

A atividade também é função da taxa de contagem da amostra avaliada, por isso, em amostras de baixa atividade, deve-se tirar proveito da geometria de contagem (aumento da massa, por exemplo) e tempo de contagem (quanto maior o tempo, mais contagens serão feitas). Em laboratórios especializados em espectrometria gama, o tempo de contagem deve ser otimizado para que se tenha limites de detecção aceitáveis utilizando tempos mínimos de contagem (NISTI et al., 2009).

Estudo pioneiro de Nisti et al. (2009) mostra a otimização do tempo de contagem a partir dos limites mínimos de detecção para 4 detectores tipo HPGe diferentes (e 4 geometrias distintas) do Laboratório de Radiometria Ambiental (LRA – IPEN). Nessa

publicação os autores concluíram que, em geral, 50.000 segundos é tempo suficiente para obter concentrações mínimas detectáveis, para outros tempos de contagem, em amostras de densidade e composição similares aquelas utilizadas no estudo, com geometrias de 0,1 L a 3 L.

Historicamente no LRA, amostras ambientais de baixa atividade têm sido avaliadas utilizando 150.000 segundos (BARROS, 2013; FONSECA, 2016), portanto, as amostras de ração seguiram este padrão. Em 2015, Shweikani e Hasan (2015) publicaram um estudo sobre a escolha do tempo de contagem e propuseram metodologia para aferição deste. A metodologia descrita foi então utilizada para demonstrar que o tempo de 150.000 s foi adequado para análise das amostras de ração.

Seguindo o procedimento sugerido pelos autores citados, foi feito o levantamento dos valores da Atividade Mínima Detectável (MDA) em função do tempo de contagem para as seguintes energias gama: 351,9 keV (^{214}Pb), 609,3 keV (^{214}Bi), 911,1 keV (^{228}Ac) e 1460,8 keV (^{40}K) (FIG. 4.1), para a amostra de ração canina Ba01, que foi selecionada por apresentar concentrações de atividade acima dos limites de detecção para todos os radionuclídeos naturais. Para cada energia, foi determinada a função correspondente de interpolação de seus pontos (exponencial de segundo grau).

Figura 4.1: MDA em função do tempo de contagem para 4 energias gama, observadas da amostra de ração canina Ba01.

Derivando-se cada função exponencial obtida, pode-se encontrar pontos a partir dos quais os valores de suas derivadas (MDA') são aproximadamente nulos e constantes em função do tempo de contagem (os quais são chamados de tempos ideais pelos autores), como mostra a FIG. 4.2.

Figura 4.2: Derivadas das funções MDA em função do tempo de contagem para as energias gama selecionadas da amostra de ração canina Ba01.

Assim, para o tempo de análise das amostras de ração (150.000 s) os valores de MDA' são iguais a: -0,03 para as energias de 351,9 keV e 609,3 keV, -0,07 para a energia de 609,3 keV e -0,27 para a energia de 1460,8 keV. Nota-se que estes valores são suficientemente próximos de zero para todas as energias e, portanto, o tempo de contagem empregado foi adequado para avaliação dos radionuclídeos naturais.

4.1.2 Concentração de Atividade das Amostras

As concentrações das atividades dos radionuclídeos naturais e artificiais eventualmente presentes nas amostras de ração e suas incertezas foram calculadas por meio das equações 3.3 e 3.4 (item 3.2). Os resultados encontrados são apresentados nas TAB. 4.1 e TAB. 4.2, respectivamente para os radionuclídeos artificiais e naturais, assim como no **Apêndice A**. Nessas amostras não foram encontradas concentrações

significativas dos radionuclídeos artificiais avaliados, cujos intervalos dos valores de MDA foram escolhidos para representá-los.

Tabela 4.1: *Atividade mínima detectável dos radionuclídeos artificiais das amostras de ração canina e felina.*

Atividade mínima detectável – Bq.kg ⁻¹						
Rações	⁶⁰ Co	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	¹³¹ I	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am
Caninas	0,7 – 1,2	0,6 – 1,0	7,7 – 11,7	0,7 – 1,1	0,8 – 1,2	0,6 – 1,1
Felinas	0,8 – 1,0	0,7 – 1,0	8,4 – 9,7	0,7 – 1,1	0,8 – 1,1	0,7 – 1,1

Tabela 4.2: *Intervalo de concentração de atividade dos radionuclídeos naturais encontrados com suas respectivas incertezas entre parênteses. O valor mínimo corresponde a menor concentração encontrada acima do nível MDA.*

Concentração de Atividade – Bq.kg ⁻¹						
Rações	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	²¹² Pb	²¹² Bi	²²⁸ Ac	⁴⁰ K
Caninas	1,4(4) – 6,0(6)	2,1(5) – 4,4(6)	3,4(6) – 3,8(7)	< 13,2	3,4(7) – 11,1(10)	122,6(68) – 409,9(189)
Felinas	2,1(4) – 4,2(5)	2,0(5) – 3,3(5)	< 2,1	< 14,3	3,4(8) – 6,3(8)	216,8(112) – 361,7(168)

Primeiramente, nota-se que as concentrações de potássio são consideravelmente maiores que aquelas dos radionuclídeos das séries do urânio e do tório. Visto que o pico de emissão gama de maior intensidade do potássio é de 1461 keV, a região de espalhamento Compton abaixo do fotopico abrange uma região larga o suficiente que dificulta a identificação de outros radionuclídeos naturais com energias mais baixas. Este comportamento pode ser verificado na figura 4.3, obtida de uma simulação utilizando o *Gamma Spectrum Generator* (NUCLEONICA, 2016), que representa um espectro gama de uma fonte de ⁴⁰K de 400 Bq obtido com um detector NaI de dimensões próximas as do cristal de germânio utilizado (respectivamente iguais a 76,2 x 76,2 mm e 62,9 x 56,2 mm).

Figura 4.3: Espectro gama simulado de uma fonte de ^{40}K com 400 Bq, considerando um detector de NaI (76,2 x 76,2 mm) e tempo de contagem de 150.000 segundos. A figura apresenta as regiões de espalhamento Compton largas, que abrangem a maioria das energias dos radionuclídeos das séries de urânio e tório.

Devido a larga faixa de espalhamento compton, a identificação das concentrações obtidas de ^{212}Bi nas rações caninas, ^{212}Pb e ^{212}Bi nas rações felinas (ver energias e probabilidade de emissão na TAB. 3.3) não ultrapassaram os limites de detecção (MDA) (cujo valor médio os representam na TAB. 4.2), pois sua concentração e sua probabilidade de emissão são baixas o suficiente para não ultrapassarem a região de espalhamento do potássio.

Partindo dos valores de concentração de atividade dos radionuclídeos naturais (apresentados no **Apêndice A**), e garantindo adequada selagem dos frascos para que não houvesse perda de radônio, utilizou-se as equações 3.5 e 3.6 (item 3.2) para encontrar as concentrações de atividade do ^{226}Ra e ^{232}Th , cujos valores são apresentados no **Apêndice A** e nos gráficos da FIG. 4.4, para as rações felinas; 4.5 e 4.6 para as rações caninas.

Figura 4.4: Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais em 13 amostras de ração felina (f): fabricantes A – S, onde as letras minúsculas representam tipos diferentes, sendo a para animais adultos e p para filhotes.

Figura 4.5: Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais em 33 amostras de ração canina: fabricantes A – G, onde as letras minúsculas representam tipos diferentes, sendo a para animais adultos, p para filhotes e s para idosos.

Figura 4.6: Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais em 32 amostras de ração canina: fabricantes H – S, onde as letras minúsculas representam tipos diferentes, sendo a para animais adultos, p para filhotes, s para idosos e w dietética.

A relação entre os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K foi verificada por meio do cálculo dos coeficientes de correlação de Pearson, cujos valores descrevem o grau de relacionamento linear entre os radionuclídeos e se encontram dentro de um intervalo entre -1 e 1. A relação será linearmente positiva para coeficientes acima de zero (indicando proporcionalidade direta) e linearmente negativo para coeficientes abaixo de zero (indicando proporcionalidade inversa). A correlação próxima de zero indica relação não linear.

A seguir, nas FIG. 4.7, 4.8 e 4.9 são apresentados gráficos de dispersão entre os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K nas amostras de ração canina e os coeficientes de correlação calculados. A partir desses cálculos, nota-se correlação mais significativa entre ^{226}Ra e ^{232}Th , fraca correlação entre ^{226}Ra e ^{40}K e correlação próxima de zero (ou seja, nenhuma relação linear) entre ^{232}Th e ^{40}K .

Figura 4.7: Gráfico de dispersão entre as concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{232}Th com seu respectivo coeficiente de correlação (intervalo de confiança igual a 95%, indicado pela elipse).

Figura 4.8: Gráfico de dispersão entre as concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{40}K com seu respectivo coeficiente de correlação (intervalo de confiança igual a 95%, indicado pela elipse).

Figura 4.9: Gráfico de dispersão entre as concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{232}Th e ^{40}K com seu respectivo coeficiente de correlação (intervalo de confiança igual a 95%, indicado pela elipse).

4.2 Análise Elementar por EDXRF

Os elementos encontrados em rações caninas e felinas, utilizando a técnica de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (EDXRF), estão descritos na TAB. 4.3 com o número de observações e intervalos de contagens obtidos. As contagens normalizadas são apresentadas de forma gráfica no **Apêndice B**. A técnica não permitiu observar chumbo, bismuto, actínio, rádio ou tório (observados com a espectrometria gama), já que suas quantidades são baixas e as linhas de energia dos outros elementos mais abundantes prejudicaram suas determinações.

Tabela 4.3: *Elementos encontrados nas rações caninas e felinas pela técnica EDXRF, número de amostras que apresentam tais elementos e contagens obtidas.*

Elemento	Rações Caninas				Rações Felinas			
	Observações	Contagens		Contagem	Observações	Contagens		Contagem
	(número)	Mínimo	Máximo	Média	(número)	Mínimo	Máximo	Média
Si	14	42	688	176,5	0	0	0	0
P	65	516	1332	944,6	13	801	1538	1142,3
S	65	333	1974	1024,4	13	1012	2717	1495,5
Cl	65	2515	10025	4756,7	13	3122	16060	6026,5
K	65	5102	13879	9336,3	13	8508	11440	10120,4
Ca	65	5685	31703	16331,2	13	5570	20109	14001,8
Ti	39	176	9089	1913,2	6	276	5234	2738,8
Mn	65	454	1752	1009,9	13	351	1183	838,5
Fe	65	2221	20687	5006,0	13	1977	4269	3415,7
Cu	11	569	1529	975,4	4	928	1575	1108,0
Zn	65	1272	10564	3934,4	13	3004	8127	4191,7
Sr	11	676	1401	1098,4	3	1239	1271	1260,3

A análise dos elementos presentes nas rações segue de forma qualitativa para as rações caninas, partindo dos dados de contagem obtidos. Dentre os métodos estatísticos, utilizou-se a análise de agrupamentos, uma vez que esta técnica permite dividir e agrupar elementos de uma amostra segundo características similares (MINGOTI, 2013). O grau de similaridade entre os elementos pode ser avaliado, por exemplo, por meio da medida da distância entre dois valores.

Tomando, por exemplo, um conjunto de 5 amostras de ração canina Fa01, Np02, Fa02, Ba02, Aa03 e considerando suas quantidades de cálcio e ferro, calcula-se a distância entre cada amostra (FIG. 4.10(a)). Os elementos de menor distância entre si serão mais similares, formando grupos (FIG. 4.10(b)).

Figura 4.10: Exemplo de uma análise de agrupamento de 5 amostras de ração canina em relação à quantidades de cálcio e ferro (a). Os grupos podem ser formados a partir da análise de distância entre os dados (b).

Dentre as técnicas de agrupamento (hierárquicas e não hierárquicas), optou-se por utilizar um método de hierarquia, o qual possibilita a construção de dendrograma e facilita a visualização de possíveis grupos. O eixo das ordenadas do dendrograma representa o nível de similaridade entre os elementos (distância) mostrados no eixo das abscissas. Assim, o primeiro dendrograma (FIG. 4.11) foi construído em função das amostras.

Nessa figura, pode-se dizer que as amostras de ração canina se dividem em 3 grandes grupos (G1, G2 e G3), sendo que a maioria das marcas (51%) pertence ao primeiro grupo; os outros dois grupos possuem 28% (G2) e 22% (G3) do total das amostras. Além disso, pode-se observar que alguns fabricantes, como F, K, N e D foram agrupados exclusivamente no terceiro grupo, sugerindo que esses fabricantes adotam alguns elementos característicos em sua fabricação. Os outros fabricantes têm marcas em todos os grupos, ou seja, pode-se inferir que possuem formulações semelhantes no que diz respeito aos elementos químicos aqui analisados.

Uma investigação foi feita tomando-se o valor médio das contagens de cada elemento por grupo. Dessa forma, pode-se descrever os três grandes grupos distintos de forma gráfica (FIG. 4.12)

Figura 4.12: Descrição dos grupos identificados no dendrograma das amostras de ração, de acordo com os elementos químicos verificados no EDXRF.

Pode-se inferir que a separação foi feita de acordo com a concentração de alguns elementos: o grupo 1 é caracterizado por rações com as concentrações mais altas de cálcio; grupo 2 são amostras com as maiores concentrações de ferro e menores concentrações de cloro e zinco; grupo 3 possuem amostras diferenciadas pelas concentrações mais baixas de cálcio e maiores concentrações de cloro e zinco. Essa análise pode ainda ser complementada com o dendrograma em função das variáveis (elementos), apresentado na FIG. 4.13.

Figura 4.13: Dendrograma do agrupamento de variáveis (utilizando o método de Ward), considerando as contagens das diferentes marcas de ração canina.

O dendrograma possui 3 grandes grupos e corrobora com a análise feita anteriormente; existe um grupo dependente da concentração de cálcio, um segundo grupo dependente das concentrações de ferro e o terceiro grupo com as concentrações de cloro e zinco dominantes.

4.3 Análise das Correlações

A radioatividade presente nas rações caninas e felinas pode estar relacionada às farinhas e componentes minerais utilizadas em sua fabricação, como observado em outros tipos de amostras. Para verificar a relação entre as possíveis variáveis, recorreu-se à estatística descritiva (para estudo individual das variáveis) e o método de análise das componentes principais (estatística multivariada).

A análise das componentes principais (comumente conhecida como PCA) é uma técnica amplamente utilizada, por se tratar de um método de redução de variáveis, que muitas vezes simplifica o estudo proposto e identifica padrões. Essa redução é feita projetando-se os dados originais a um novo sistema de coordenadas, que descreva a relação entre as variáveis de forma mais significativa. A relação significativa proposta pelo método é aquela cuja variância entre os dados é maior.

Assim, na análise por PCA, tomam-se as variâncias de um conjunto de dados

e, selecionando aqueles cujas variâncias são maiores, cria-se um novo sistema de coordenadas. Cada coordenada nova é chamada de componente principal, encontrada por meio de uma transformação linear dos dados originais onde, as variâncias mais altas estarão na primeira componente, as segundas maiores variâncias estarão na segunda componente e assim por diante (MINGOTI, 2013).

As variáveis quantitativas escolhidas para análise foram: concentração de atividade dos radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra e ^{232}Th , contagens dos elementos que aparecem na maioria das amostras: cálcio, ferro, cloro, zinco, enxofre, manganês e fósforo. Além destas, foram consideradas duas variáveis qualitativas¹: presença de farinha de vísceras e presença de farinha de carne e ossos, seguindo o parâmetro de presença ou ausência destes ingredientes, uma vez que os rótulos das amostras não fornecem suas quantidades.

Primeiramente, tem-se a estatística descritiva de cada variável quantitativa. Para aquelas amostras cujas concentrações estiveram abaixo do limite de detecção, foram considerados os valores MDA, garantindo maior número de dados para a estatística (TAB. 4.4).

Tabela 4.4: *Estatística descritiva das variáveis, inferidas das 65 rações caninas.*

Variáveis	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Desvio Padrão
^{40}K (Bq.kg ⁻¹)	155,7	368,0	246,6	70,8
^{226}Ra (Bq.kg ⁻¹)	1,2	5,0	2,3	0,8
^{232}Th (Bq.kg ⁻¹)	1,2	9,4	3,9	1,9
P (Contagens)	516	1332	940,9	207,2
S (Contagens)	333	1974	1024,4	349,0
Cl (Contagens)	2515	10025	4756,7	1693,0
Ca (Contagens)	5685	31703	16331,4	5718,2
Mn (Contagens)	454	1752	1009,9	305,6
Fe (Contagens)	2221	20687	5006,0	3798,5
Zn (Contagens)	1272	10564	3934,4	1711,4

¹Medidas realizadas anteriormente no LRA (Pecequilo, B.R.S comunicação pessoal) comprovaram a presença de ^{40}K em 24 amostras de farinhas de vísceras e 63 amostras de farinhas de carne e ossos, além da presença de ^{226}Ra e ^{232}Th nas mesmas farinhas de carne e ossos.

A correlação entre as concentrações de atividade dos radionuclídeos e as quantidades dos elementos (matriz dos dados originais de 65 amostras por 10 variáveis) foi verificada por meio dos coeficientes de Pearson, cujos valores são apresentados na matriz de correlação a seguir (TAB. 4.5).

Tabela 4.5: *Coefficientes de correlação entre as variáveis das razões caninas, cujos valores em negritos correspondem às correlações mais altas.*

	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	P	S	Cl	Ca	Mn	Fe	Zn
⁴⁰ K	1									
²²⁶ Ra	0,128	1								
²³² Th	0,369	0,507	1							
P	0,154	0,356	0,387	1						
S	-0,029	-0,391	-0,432	-0,221	1					
Cl	-0,067	-0,173	-0,180	-0,253	0,400	1				
Ca	-0,322	0,413	0,3307	0,423	-0,329	-0,275	1			
Mn	0,400	0,149	0,140	0,173	-0,235	-0,454	-0,097	1		
Fe	0,084	0,128	0,137	-0,318	-0,214	-0,258	0,131	0,157	1	
Zn	-0,215	-0,232	-0,326	-0,219	0,571	0,601	-0,321	-0,299	-0,236	1

Nota-se que existe maior correlação entre as concentrações de ²²⁶Ra e ²³²Th, que normalmente são encontrados juntos na natureza (UNSCEAR, 2008a), e boa correlação entre estes radionuclídeos com as quantidades de cálcio. A correlação mais significativa do potássio foi verificada com a quantidade de manganês e concentração de ²³²Th.

A próxima etapa do método de análise de componentes principais (PCA) é transpor os dados originais para o novo sistema de coordenadas, ou seja, encontrar os autovalores e autovetores da matriz de correlação (TAB. 4.5). Uma vez que existem 10 variáveis, são obtidos 10 autovalores e 10 autovetores. Os autovetores representam as correlações entre as componentes principais e as variáveis originais e os autovalores representam a variância total explicada por cada componente (MINGOTI, 2013).

Para reduzir o número de variáveis, uma análise dos autovalores é feita para se determinar o número de componentes a ser utilizado, como mostra a FIG. 4.14.

Figura 4.14: Autovalores correspondentes às componentes principais (dispersão) e a variância total explicada por cada uma (barras). Nota-se que as cinco primeiras componentes somam 82% da variância total e são suficientes para descrever todas as relações entre as variáveis consideradas neste trabalho.

Cinco componentes principais foram escolhidas, pois juntas somam 82% da variância total, e são apresentadas na TAB. 4.6. Portanto, a análise pelo método de PCA reduziu o número de variáveis iniciais de 10 para 5 componentes.

Nota-se na FIG. 4.14, que a primeira componente principal explica cerca de 33% da variância total e está correlacionada com os radionuclídeos de ^{226}Ra e ^{232}Th e à concentração de cálcio; a segunda componente explica cerca de 16% da variância total e está relacionada à quantidade de cálcio; a componente 3 explica 14% da variância total e está correlacionada principalmente à quantidade de fósforo e ao radionuclídeo ^{40}K ; a quarta componente está relacionada às quantidades de cloro, ferro e ao radionuclídeo ^{232}Th e, finalmente, a componente 5 está correlacionada às quantidades de enxofre, manganês e zinco.

Tabela 4.6: Componentes principais obtidas da matriz de correlação (TAB. 4.5), por meio do cálculo de seus autovetores.

Variáveis	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
^{40}K	0,158	-0,488	0,483	0,219	-0,118
^{226}Ra	0,344	0,224	0,161	0,361	0,360
^{232}Th	0,372	0,083	0,284	0,415	-0,177
P	0,290	0,296	0,446	-0,342	0,139
S	-0,398	-0,037	0,184	-0,047	0,468
Cl	-0,364	0,181	0,266	0,430	-0,153
Ca	0,297	0,515	-0,207	-0,023	0,232
Mn	0,253	-0,475	0,118	-0,274	0,458
Fe	0,158	-0,269	-0,508	0,484	0,311
Zn	-0,407	0,138	0,208	0,188	0,451
Autovalor	3,34	1,64	1,41	1,08	0,69
Variância explicada (%)	33	16	14	11	7

Embora as cinco componentes descrevam as relações entre as variáveis satisfatoriamente, decidiu-se utilizar apenas as componentes 1 e 2 pois, além de incorporarem as maiores variâncias, também têm correlações significativas (valores em negrito para as positivas e em vermelho para as mais negativas) entre os radionuclídeos de interesse e os elementos observados. Então, pode-se representar as variáveis originais nesse novo sistema de coordenadas (componente principal 1 em função da componente principal 2) a partir dos autovetores, cujo gráfico está representado na FIG. 4.15.

Figura 4.15: Representação gráfica das variáveis analisadas em função de suas componentes principais

No gráfico, a correlação entre as variáveis originais é visualizada da seguinte forma: correlação positiva para ângulos agudos, correlação negativa para ângulos obtusos e correlação nula para ângulos retos. Assim, pode-se sugerir que as amostras estão divididas, de acordo com suas variáveis, em 3 grupos distintos: um primeiro grupo cujos elementos são ^{226}Ra , ^{232}Th , Ca e P; segundo grupo de ^{40}K , Fe e Mn e um último grupo com os elementos Cl, Zn e S. Nota-se que, os grupos seguiram a mesma divisão feita na análise por agrupamento (FIG. 4.13), ou seja, mesmo utilizando outro tipo de método estatístico e ainda acrescentando 3 novas variáveis, os resultados concordam entre si, reforçando as hipóteses de correlação entre os elementos.

Ainda nas coordenadas das componentes principais, pode-se representar as amostras de ração individualmente (multiplicação da matriz original pela matriz dos

autovetores) utilizando um gráfico de dispersão (FIG. 4.16):

Figura 4.16: Representação gráfica das variáveis e observações em função de suas componentes principais.

As quantidades qualitativas, presença de farinhas de carne e ossos e presença de farinhas de vísceras, podem ser inseridas nesta figura, utilizando a cores para indicar sua presença (FIG. 4.17).

Em uma análise qualitativa da FIG. 4.17(a), a inclusão das farinhas de vísceras não aparenta contribuir significativamente nas concentrações dos radionuclídeos, já que 65% das amostras que contém essas farinhas estão nos quadrantes 2 e 3, onde as correlações com rádio, tório e potássio são menores. Em contrapartida, na FIG. 4.17(b), a presença de farinha de carne e ossos, na elaboração de rações para cães, poderia estar ligada à presença dos radionuclídeos analisados, já que 59% das amostras com esse tipo de farinha estão nos quadrantes 1 e 4, onde as correlações com rádio, tório e potássio são maiores.

(a)

(b)

Figura 4.17: Rações caninas diferenciadas de acordo com a presença de farinha de vísceras (a) e farinha de carne e ossos (b).

4.4 Análise de Risco por Ingestão

4.4.1 Verificação da Geometria do Corpo do Animal

Figuras geométricas simples foram utilizadas para descrever alguns órgãos do corpo do animal, cuja disposição é mostrada na FIG. 4.18. A probabilidade de interação de um fóton que viaja neste sistema será fortemente dependente da sua energia e do material alvo. A geometria em si não exerce influência no que diz respeito à probabilidade de interação. No entanto, a composição dos órgãos e tecidos implementada, exclui outros órgãos e tecidos da cavidade abdominal e torácica do animal, o que poderia influenciar nas interações fotônicas.

Figura 4.18: Geometria utilizada no código Monte Carlo (MCNP), em plano frontal (esquerda) e transversal (direita).

Para que se pudesse verificar a influência da geometria construída na absorção dos fótons, foram encontradas as frações absorvidas pelos volumes alvo devido exposição à fontes internas monoenergéticas. Os valores obtidos foram comparados aos dados publicados por Padilla *et al.* (2008), cuja geometria utilizada é a reconstrução tomográfica de um cão adulto e, portanto, mais realista.

Para cada energia considerada (variando de 0,01 a 2,0 MeV), foram simulados 10^7 eventos para os fótons provenientes do estômago totalmente preenchido pela fonte monoenergética. Utilizando o *tally* *F8, tem-se a deposição de energia para os diferentes volumes alvo. As frações absorvidas específicas foram calculadas ($*F8/(E_i.m)$) para cada região considerada (TAB. 4.7) e comparadas aos resultados obtidos por Padilla *et al.* (2008) nas FIG. 4.19 a FIG. 4.25.

Tabela 4.7: Frações absorvidas específicas de diferentes energias nos órgãos alvo, considerando o *estômago* como um volume fonte gama. Os valores de massa foram calculados pelo MCNP, utilizando os dados de volume e densidade da TAB. 3.4 fornecidos ao programa.

Órgão alvo	Volume Fonte: estômago											
	Massa (g)	Energias (MeV)										
		0,01	0,015	0,02	0,03	0,05	0,10	0,20	0,50	1,0	1,5	2,0
Estômago	322,8	3,0E+00	2,7E+00	2,22E+00	1,30E+00	5,59E-01	3,25E-01	3,24E-01	3,27E-01	2,95E-01	2,62E-01	2,35E-01
Fígado	699,2	4,6E-05	2,2E-03	1,20E-02	4,06E-02	4,97E-02	3,54E-02	2,91E-02	2,59E-02	2,33E-02	2,14E-02	1,99E-02
Intestino	522,5	1,7E-06	7,8E-04	8,15E-03	3,50E-02	4,41E-02	3,17E-02	2,64E-02	2,36E-02	2,13E-02	1,96E-02	1,83E-02
Pâncreas	2,2	0	1,1E-02	7,27E-02	1,69E-01	1,39E-01	8,32E-02	7,29E-02	6,47E-02	5,85E-02	5,29E-02	4,86E-02
Ovário (D)	1,0	0	0	0	2,24E-03	1,15E-02	1,11E-02	9,93E-03	8,41E-03	7,23E-03	6,94E-03	6,87E-03
Ovário (E)	1,0	0	0,0E+00	3,22E-04	1,14E-02	3,01E-02	2,10E-02	1,73E-02	1,37E-02	1,36E-02	1,22E-02	1,03E-02
Pulmão (D)	228,6	0	0,0E+00	1,00E-04	3,01E-03	8,61E-03	8,14E-03	6,89E-03	6,26E-03	5,84E-03	5,48E-03	5,11E-03
Pulmão (E)	228,6	4,4E-07	9,5E-04	9,83E-03	3,37E-02	3,50E-02	2,28E-02	1,90E-02	1,72E-02	1,55E-02	1,41E-02	1,31E-02
Coração	246,7	0	4,7E-04	6,19E-03	3,14E-02	4,30E-02	3,09E-02	2,53E-02	2,24E-02	2,02E-02	1,86E-02	1,73E-02
Restante	21,5E+04	1,9E-03	6,1E-03	1,24E-02	2,22E-02	2,28E-02	1,70E-02	1,52E-02	1,43E-02	1,32E-02	1,23E-02	1,15E-02

Figura 4.19: *Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla et al., considerando o estômago como fonte radioativa e estômago como volume alvo*

Figura 4.20: *Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla et al., considerando o estômago como fonte radioativa e fígado como volume alvo*

Figura 4.21: *Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla et al., considerando o estômago como fonte radioativa e intestino como volume alvo*

Figura 4.22: *Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla et al., considerando o estômago como fonte radioativa e ovários como volumes alvo*

Figura 4.23: *Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla et al., considerando o estômago como fonte radioativa e pulmões como volumes alvo*

Figura 4.24: *Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla et al., considerando o estômago como fonte radioativa e pâncreas como volume alvo*

Figura 4.25: *Frações absorvidas específicas encontradas neste trabalho comparados aquelas encontrados por Padilla et al., considerando o estômago como fonte radioativa e coração como volume alvo*

Para alguns órgãos, a comparação foi feita entre a fração absorvida específica do órgão total (este trabalho) e a parede do órgão (Padilla *et al.*), como é o caso do estômago, intestino e coração. Mesmo assim, a comparação entre os dados pode ser justificada, uma vez que todas as curvas construídas apresentaram comportamentos similares, principalmente para o intestino (cujos dados seguem praticamente iguais a partir de 0,3 MeV). Além disso, observa-se que as diferenças entre as curvas obtidas neste trabalho e aquelas apresentadas por Padilla *et al.* não seguem o mesmo padrão, indicando não haver erros sistemáticos na simulação.

Em alguns volumes alvo: estômago (FIG. 4.19), fígado (FIG. 4.20) e pulmão esquerdo (FIG. 4.23); as curvas aparentam diferenças significativas, devido à diferença entre as geometrias dos órgãos. No entanto, é possível verificar que, para a faixa entre 0,1 e 2,0 MeV, que compreende as energias dos fótons considerados neste trabalho (tabela 3.3), as frações absorvidas específicas têm a mesma ordem de grandeza para os dois modelos. Para outros órgãos: ovário esquerdo (4.22), pulmão direito (4.23), pâncreas 4.24) e coração 4.25), os dados apresentam diferenças mais relevantes (não maiores que 1 ordem de grandeza) para a mesma faixa de energia e são, no máximo,

três vezes maiores.

Todas as curvas sugerem que a geometria construída, embora irreal, tem comportamento semelhante à uma geometria realista para a maioria dos órgãos, no que diz respeito às frações absorvidas por fótons e elétrons secundários. Assim, o modelo canino desenvolvido pode ser utilizado para a avaliação das doses absorvidas internas por ingestão de radionuclídeos em cães. Uma ressalva deve ser feita para aqueles órgãos cujas diferenças foram maiores; o cálculo da dose absorvida interna deve ser utilizado com maior prudência, principalmente em casos em que a fonte radioativa apresente atividade alta.

4.4.2 Cálculo das Doses Absorvidas Internas

Foram considerados dois casos irreais, porém conservativos, em que a fonte radioativa preenche completamente o órgão fonte (estômago) e todos os radionuclídeos são integralmente absorvidos (desconsiderando sua excreção). No primeiro caso, a fonte radioativa é uma composição dos radionuclídeos naturais apenas, enquanto o segundo caso é uma fonte radioativa cuja composição leva todos os radionuclídeos naturais e artificiais aqui estudados. Em ambos os casos, 10^7 fótons primários foram simulados usando o *tally* *F8, contabilizando também os elétrons e fótons secundários produzidos nas interações. Os resultados obtidos nos dois casos passaram em todos os testes estatísticos briesmeister feitos pelo MCNP, para todos os volumes alvo.

Considerando apenas os radionuclídeos naturais, a fonte simulada contém fótons com todas as energias consideradas dos radionuclídeos de interesse, ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{228}Ac e ^{40}K (ver TAB. 3.3, item 3.2). Para o cálculo da dose interna, foi selecionada a amostra com maior atividade (amostra Ba07 de 420 Bq.kg^{-1}) e utilizou-se a equação 3.9. Os resultados do MCNP e do cálculo da dose estão na TAB. 4.8 a seguir.

Tabela 4.8: Resultados obtidos da simulação por MCNP e do cálculo da dose absorvida interna, considerando a fonte gama volumétrica (estômago), cujo espectro compreende apenas radionuclídeos naturais.

$A_t = 420 \text{ Bq.kg}^{-1}$ (amostra Ba07).				
$n_t = 2,21$ fótons por transformação nuclear.				
Órgão alvo	*F8	R ¹	Massa (kg) ²	D _i (Gy/dia)
Estômago	6,00E-02	0,0008	0,323	1,7E-11
Fígado	1,04E-02	0,0020	0,699	1,3E-12
Intestino	7,12E-03	0,0020	0,522	1,2E-12
Pâncreas	8,05E-05	0,0207	0,002	3,2E-12
Ovário (D)	5,18E-06	0,0763	0,001	4,9E-13
Ovário (E)	7,82E-06	0,0601	0,001	7,3E-13
Pulmão (D)	8,32E-04	0,0062	0,229	3,2E-13
Pulmão (E)	2,24E-03	0,0040	0,229	8,8E-13
Coração	3,34E-03	0,0035	0,247	1,2E-12
Restante	1,80E-01	0,0004	21,547	7,4E-13
Total			23,799	2,7E-11

¹Erro relativo $R = \sigma / \bar{x}$

²Calculado pelo MCNP-4C.

No segundo caso, além dos radionuclídeos naturais, foram considerados também os radionuclídeos artificiais, ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{103}Ru , ^{106}Ru e ^{241}Am (TAB. 3.3, item 3.2). Supõe-se a atividade total da amostra como sendo a atividade dos radionuclídeos naturais (420 Bq.kg^{-1}) somada às atividades mínimas detectáveis dos radionuclídeos artificiais estudados (que somam 14 Bq.kg^{-1}). Os resultados do MCNP e do cálculo de dose estão na TAB. 4.9 a seguir.

Tabela 4.9: Resultados obtidos da simulação por MCNP e do cálculo da dose absorvida interna, considerando a fonte gama volumétrica (estômago), cujo espectro compreende radionuclídeos naturais e artificiais.

$A_t = 434 \text{ Bq.kg}^{-1}$ (amostra Ba07).				
$n_t = 7,34$ fótons por transformação nuclear.				
Órgão alvo	*F8	R ¹	Massa (kg) ²	D _i (Gy/dia)
Estômago	6,16E-02	0,0008	0,323	5,8E-11
Fígado	1,07E-02	0,0020	0,699	4,7E-12
Intestino	7,29E-03	0,0023	0,522	4,3E-12
Pâncreas	8,18E-05	0,0208	0,002	1,1E-11
Ovário (D)	4,87E-06	0,0803	0,001	1,6E-12
Ovário (E)	8,18E-06	0,0632	0,001	2,6E-12
Pulmão (D)	8,61E-04	0,0061	0,229	1,2E-12
Pulmão (E)	2,30E-03	0,0039	0,229	3,1E-12
Coração	3,28E-03	0,0035	0,247	4,1E-12
Restante	1,84E-01	0,0004	21,547	2,6E-12
Total			23,799	9,37E-11

¹Erro relativo $R = \sigma / \bar{x}$

²Calculado pelo MCNP-4C.

A absorção dos radionuclídeos pelos seres vivos depende de alguns fatores como: espécie, via de entrada (inalação, ingestão, injeção), biodisponibilidade do elemento, sua motilidade no organismo (que varia com o tipo de alimento), estado nutricional do animal e sua idade (LE; HENDRIKS, 2013). Na literatura é possível encontrar o registro dos índices de toxicidade causados por ingestão de compostos de

urânio em diferentes órgãos caninos (SULLIVAN, 1980; ARRUDA-NETO et al., 2004; SHEPPARD et al., 2005; KONIETZKA, 2015).

Com relação às doses absorvidas pela exposição à radiação ionizante, Driver (1994) descreve um valor de dose absorvida de corpo total (exposições internas e externas à radiação gama) que eliminam 50% dos indivíduos, de uma população de cães, em 30 dias como sendo igual a 3,5 Gy. Considerando os valores de dose encontrados aqui, 30 dias de exposição contribuiriam para um valor de dose interna igual a 2,8 nGy.

Os estudos sobre efeitos biológicos da radiação ionizante em plantas e animais não contemplam, até a divulgação desta tese, dados sobre limites de dose para cães e gatos, por exposição interna via ingestão de radionuclídeos. No entanto, existem valores de taxas de dose referência para proteção de plantas e animais (HOWARD et al., 2010): IAEA e UNSCEAR sugerem que valores abaixo de 1 mGy/dia, por exposições crônicas, não promoverão efeitos populacionais significativos para animais terrestres; ERICA utiliza um valor igual a 10 μ Gy/h (0,2 mGy/dia) para plantas e animais de todos os ecossistemas; a ICRP apresenta valores diferentes para cada animal referência, sendo igual a 0,1 – 1 mGy/dia para o representante de mamífero terrestre de pequeno porte.

Portanto, pode-se afirmar que os valores de dose absorvida interna calculados nesta tese, que considera o cenário mais conservador possível (e assim estaria a favor da proteção radiológica), são baixos o suficiente para inferir que as marcas de ração canina avaliadas não fornecem riscos radiológicos para os animais que as consomem.

CONCLUSÕES

O estudo radiométrico de amostras de rações comerciais destinadas à cães e gatos permitiu, pela primeira vez, verificar os níveis de radioatividade natural e artificial presentes neste tipo de alimento, bem como investigar os possíveis riscos associados à sua ingestão.

Dos experimentos utilizando espectrometria gama de alta resolução, verificou-se que as 65 amostras de ração canina e as 13 amostras de ração felina não apresentaram contaminação pelos radionuclídeos artificiais, ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{106}Ru , ^{103}Ru , ^{131}I e ^{241}Am . Considerando os radionuclídeos naturais, verificou-se que todas as amostras possuem baixos níveis de concentração de atividade, cujos valores variaram de $0,9 \pm 0,3$ Bq/kg a $5,1 \pm 0,7$ Bq/kg para o ^{226}Ra , de $1,2 \pm 0,4$ Bq/kg a $11,1 \pm 1,0$ Bq/kg para o ^{232}Th e de 156 ± 7 Bq/kg a 410 ± 19 Bq/kg para o ^{40}K .

Ainda com relação à espectrometria gama, sendo que as amostras possuem densidades menores que $1,0 \text{ g/cm}^3$ (material utilizado para levantamento das curvas de eficiência e radiação de fundo), os resultados de concentração de atividade não necessitam de correção por auto atenuação. Também verificou-se que o tempo de contagem historicamente utilizado no Laboratório de Radiometria Ambiental do IPEN foi adequado para a avaliação das amostras analisadas.

Utilizando a técnica de fluorescência de raios - X por dispersão de energia, foi verificada a presença de metais e outros elementos na composição das rações. Os elementos encontrados nas amostras de ração canina foram: silício (em 14 amostras), fósforo (em 65 amostras), enxofre (em 65 amostras), cloro (em 65 amostras), potássio (em 65 amostras), cálcio (em 65 amostras), titânio (em 39 amostras), manganês (em 65 amostras), ferro (em 65 amostras), cobre (em 11 amostras), zinco (em 65 amostras)

e estrôncio (em 11 amostras).

De acordo com o dendograma construído, notou-se a formação de três grandes grupos, cuja separação foi possivelmente feita de acordo com a concentração de alguns elementos. No grupo 1 estão reunidas as amostras com maiores concentrações de cálcio; no grupo 2 estão as amostras com altas concentrações de ferro e baixas concentrações de cloro e zinco; o grupo 3 é composto por amostras diferenciadas pelas concentrações baixas de cálcio e altas de cloro e zinco. Além disso, notou-se que quatro fabricantes foram agrupados exclusivamente no terceiro grupo, sugerindo que estes adotam alguns elementos característicos em sua fabricação.

A técnica não permitiu observar concentrações de chumbo, bismuto, actínio, rádio ou tório, já que sua concentração é baixa e as linhas de energia dos outros elementos mais abundantes prejudica a determinação destes.

As correlações existentes entre as concentrações dos radionuclídeos verificados na espectrometria gama e os elementos encontrados no EDXRF, foi investigada utilizando estatística multivariada. A matriz dos coeficientes de Pearson das variáveis mostrou que existe maior correlação entre as concentrações de ^{226}Ra e ^{232}Th , como esperado, e boa correlação entre estes radionuclídeos com as concentrações de cálcio. Além disso, verificou-se que a correlação mais significativa do potássio ocorreu com a concentração de manganês e ^{232}Th .

O agrupamento feito pelo método de análise utilizando componentes principais corrobora com os resultados encontrados pela análise por agrupamento, fortalecendo as hipóteses acerca das relações entre os radionuclídeos e os elementos encontrados no EDXRF. A partir da análise qualitativa da presença de farinhas de vísceras e de carne e ossos nas rações, pode-se concluir que a inclusão das farinhas de vísceras não contribui significativamente nas concentrações dos radionuclídeos; porém, a presença de farinha de carne e ossos na elaboração de rações para cães, poderia estar ligada à presença dos radionuclídeos analisados neste trabalho.

A simulação das energias absorvidas por diferentes órgãos caninos foi feita pelo método de Monte Carlo, utilizando geometrias esféricas para construção do corpo do animal e dados de volume para órgãos caninos encontrados na literatura. A geometria construída é simplificada, porém apresentou comportamento semelhante à uma geometria realista para a maioria dos órgãos, no que diz respeito às frações

absorvidas por fótons e elétrons secundários. Assim, pode-se concluir que o modelo canino desenvolvido pode ser utilizado para a avaliação das doses absorvidas internas por ingestão de radionuclídeos em cães.

As doses absorvidas internas foram calculadas utilizando duas fontes de radiação diferente, uma composta apenas por radionuclídeos naturais e a outra também por radionuclídeos artificiais. Nos dois casos, supondo os cenários mais conservadores possíveis, as doses absorvidas internas foram iguais a $0,3 \mu\text{Gy}/\text{dia}$ e $0,9 \mu\text{Gy}/\text{dia}$, respectivamente para o primeiro e segundo caso. Considerando os níveis de referência para população de mamíferos terrestres ($< 1 \text{ mGy}/\text{dia}$), ou considerando o valor de dose absorvida de corpo total (por exposições internas e externas à radiação gama) que eliminam 50% dos indivíduos de uma população de cães em 30 dias ($3,5 \text{ Gy}$), pode-se dizer que os níveis de dose absorvida inferidas neste trabalho são baixos o suficiente, concluindo-se que as marcas de ração canina avaliadas não fornecem riscos radiológicos para os animais que as consomem.

Sugestões para futuros trabalhos

- Elaborar um modelo dosimétrico mais realista para cães e gatos, utilizando a reconstrução tomográfica de animais sadios.
- Quantificação dos elementos verificados por meio da técnica EDXRF, utilizando padrões adequados para a análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

ABINPET. **Setor PET deve encerrar 2016 com 5,7 % de crescimento em faturamento, menor índice desde 2010.** *Associação Brasileira da Indústria de Produtos para Animais de Estimação*, 2016. Disponível em: <<http://abinpet.org.br>>.

ARRUDA-NETO, J. D. T.; GUEVARA, M. V. M.; NOGUEIRA, G. P.; TARICANO, I. D.; SAIKI, M.; ZAMBONI, C. B.; BONAMIN, L. V.; CAMARGO, S. P.; CESTARI, A. C.; DEPPMAN, A.; GARCIA, F.; GOUVEIA, A. N.; GUZMAN, F.; HELENE, O. A. M.; JORGE, S. A. C.; LIKHACHEV, V. P.; MARTINS, M. N.; MESA, J.; RODRIGUEZ, O.; VANIN, V. R. Long-term accumulation and microdistribution of uranium in the bone and marrow of beagle dog. *Int. J. Radiat. Biol.*, v. 80, p. 567–575, ago. 2004. ISSN 0955-3002.

ATTIX, F. H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1986.

BARROS, L. F. *Avaliação da variação da radioatividade natural em areias da praia de Camburi - Vitória - Espírito Santo com fatores climatológicos e geológicos da região*. Dissertação (Mestrado), 2013. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

BERESFORD, N. A.; BALONOV, M.; BEAUGELIN-SEILLER, K.; BROWN, J.; COPPLESTONE, D.; HINGSTON, J. L.; HORYNA, J.; HOSSEINI, A.; HOWARD, B. J.; KAMBOJ, S.; NEDVECKAITE, T.; OLYSLAEGERS, G.; SAZYKINA, T.; BATLLE, J. V. i; YANKOVICH, T. L.; YU, C. An international comparison of models and approaches for the estimation of the radiological exposure of non-human biota. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 66, n. 11, p. 1745–1749, 2008.

BOLCH, W. E.; ECKERMAN, K. F.; SGOUROS, G.; THOMAS, S. R. Mird pamphlet no. 21: A generalized schema for radiopharmaceutical dosimetry-standardization of nomenclature. *J. Nucl. Med.*, v. 50, n. 3, p. 477–484, 2009. ISSN 0161-5505.

BRIESMEISTER, J. F. *MCNP - A General Monte Carlo N - particle transport code. Version 4C*: Los Alamos National Laboratory Report. [S.l.], 2000.

*De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

BROWN, J.; ALFONSO, B.; AVILA, R.; BERESFORD, N.; COPPLESTONE, D.; PRÖHL, G.; ULANOVSKY, A. The ERICA Tool. *J. Environ. Radioact.*, v. 99, n. 9, p. 1371–1383, 2008.

CAFFREY, E.; HIGLEY, K. Creation of a voxel phantom of the ICRP reference crab. *J. Environ. Radioact.*, v. 120, p. 14–18, 2013.

CAFFREY, E.; JOHANSEN, M.; HIGLEY, K. Voxel modeling of rabbits for use in radiological dose rate calculations. *J. Environ. Radioact.*, v. 151, p. 480–486, 2016.

CAMPOS, P. H. O. V. de. *Caracterização de pinturas da artista Anita Malfatti por meio de técnicas não destrutivas*. Tese (Doutorado), 2015. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CANBERRA. Germanium detectors. Acesso em: dez. 2016. Disponível em: <<http://www.canberra.com/products/detectors/germanium-detectors.asp>>

CARCIOFI, A.; VASCONCELLOS, R.; BORGES, N.; MORO, J.; PRADA, F.; FRAGA, V. O. Composição nutricional e avaliação de rótulo de rações secas para cães comercializadas em Jaboticabal-SP. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 58, n. 3, p. 421–426, 2006.

CARCIOFI, A. C. Fontes de proteína e carboidratos para cães e gatos. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 37, n. spe, p. 28–41, 2008.

CARCIOFI, A. C. **Macroelementos para cães e gatos. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"**. Acesso em: jul. 2016. Disponível em: <<http://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/clinicacv/AULUSCAVALIERICARCIOFI/macroelementos.pdf>>.

CASACUBERTA, N.; MASQUE, P.; GARCIA-ORELLANA, J.; BRUACH, J. M.; ANGUITA, M.; GASA, J.; VILLA-ALFAGEME, M.; HURTADO, S.; GARCIA-TENORIO, R. Radioactivity contents in dicalcium phosphate and the potential radiological risk to human populations. *J. Hazard. Mater.*, v. 170, n. 2-3, p. 814–823, 2009. ISSN 0304-3894.

CASACUBERTA, N.; TRAVERSA, F.; MASQUÉ, P.; GARCIA-ORELLANA, J.; ANGUITA, M.; GASA, J.; GARCIA-TENORIO, R. Distribution and biokinetic analysis of ^{210}Pb and ^{210}Po in poultry due to ingestion of dicalcium phosphate. *Sci Total Environ*, v. 408, n. 20, p. 4695–4701, 2010.

CASTILLO, H.; SCHODERBEK, D.; DULAL, S.; ESCOBAR, G.; WOOD, J.; NELSON, R.; SMITH, G. Stress induction in the bacteria *Shewanella oneidensis* and *Deinococcus radiodurans* in response to below-background ionizing radiation. *Int. J. Radiat. Biol.*, v. 91, n. 9, p. 749–756, 2015.

CAVALCANTE, F.; PECEQUILO, B. R. S. Natural and anthropogenic radionuclides in brazilian commercial dog food: preliminary results. In: ***Proceedings of the 3rd International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity***. [s.n.], 2014. Disponível em: <<http://intranet.pacifico-meetings.com/amsysweb/publicacionOnline.jsf?id=146>>.

CAVALCANTE, F.; PECEQUILO, B. R. S. Activity concentrations of natural and artificial radionuclides in feline dry food. In: ***Proceedings of the International Conference on Environmental Radioactivity***. [S.l.: s.n.], 2015.

CNEN. **Posição regulatória 3.01/006:2011 - Medidas de Proteção e Critérios de Intervenção em Situações de Emergência**. Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2005.

CODEX. **Codex General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed**. Revision 4 - 2009, Amendment 2 - 2010, n. 193, 2009.

DESIDERI, D.; ROSELLI, C.; FORINI, N.; RONGONI, A.; MELI, M. A.; FEDUZI, L. Alpha and gamma spectrometry for the radiological characterization of animal feed. ***Microchem. J.***, v. 116, p. 41–46, 2014. ISSN 0026-265X.

DEYDIER, E.; GUILLET, R.; SARDA, S.; SHARROCK, P. Physical and chemical characterisation of crude meat and bone meal combustion residue: “waste or raw material?”. ***J. Hazard Mater.***, v. 121, n. 1-3, p. 141–148, 2005.

DRIVER, C. J. Ecotoxicity literature review of selected hanford site contaminants. PNL-9394. ***Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, USA***, 1994.

EISBERG, R.; RESNICK, R. ***Física Quântica - Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas***. [S.l.]: Elsevier, 1979. ISBN 85-7001-309-4.

ELIAS, C. ***Qualidade nutricional de rações para cães: influência de Zn na absorção de Cu e na prevenção de doenças hepáticas***. Tese (Doutorado), 2015. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, São Paulo.

ELIAS, C.; FERNANDES, E. A. de N.; BACCHI, M. A. Neutron activation analysis for assessing chemical composition of dry dog foods. ***J. Radioanal. Nucl. Chem.***, v. 291, n. 1, p. 245–250, 2012. ISSN 0236-5731.

EVANS, R. D. ***The Atomic Nucleus***. New York: McGraw-Hill, 1972.

FAO. ***Use of Phosphate Rocks For Sustainable Agriculture (FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletins)***. [S.l.]: FAO, 2004. ISBN 92-5-105030-9.

FERNANDES, E. A. D. N.; ELIAS, C.; BACCHI, M. A.; BODE, P. Trace element measurement for assessment of dog food safety. ***Environmental Science and Pollution Research***, Springer Nature, fev. 2017.

FILHO, I. V. da L.; SCHEIBEL, V.; APPOLONI, C. R. 40K, 226Ra and 228Ra series in bovine and poultry feed and in dicalcium phosphate DCP samples by gamma-ray spectrometry. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 59, 2016.

FILHO, V. F. N. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e reflexão total (TXRF)**. CENA – ESALQ/USP, Acesso em: 12 de jun. 1999. Disponível em: <http://www.raiosx.ufc.br/site/wp-content/uploads/downloads/2012/10/EDXRF_TXRF.pdf>.

FONSECA, L. M. da. **Avaliação da radioatividade natural em tintas de uso comercial no Brasil**. Dissertação (Mestrado), 2016. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

FORTES, C. M. L. S. **Alimentos Protéicos na Formulação de Rações para Cães**. In: *Anais do ZOOTECH 2005*. [S.l.: s.n.], 2005a.

FORTES, C. M. L. S. **Formulação de Rações para Cães**. In: *Anais do ZOOTECH 2005*. [S.l.: s.n.], 2005b.

GOMEZ-ROS, J. M.; PROEHL, G.; ULANOVSKY, A.; LIS, M. Uncertainties of internal dose assessment for animals and plants due to non-homogeneously distributed radionuclides. *J Environ Radioact*, v. 99, n. 9, p. 1449–1455, 2008. ISSN 0265-931X.

HOWARD, B. J.; BERESFORD, N. A.; ANDERSSON, P.; BROWN, J. E.; COPPLESTONE, D.; BEAUGELIN-SEILLER, K.; GARNIER-LAPLACE, J.; HOWE, P. D.; OUGHTON, D.; WHITEHOUSE, P. Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context—an overview of the PROTECT coordinated action project. *J. Radiol. Prot.*, IOP Publishing, v. 30, n. 2, p. 195–214, 2010.

IAEA. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to wildlife. *International Atomic Energy Agency*, IAEA Technical Reports Series 479. Vienna, 2014.

IAEA. **The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition**. *International Atomic Energy Agency*, Technical Reports Series No. 476. Vienna, 2014.

ICRP. **Recommendations of the ICRP**. *International Commission on Radiation Protection*, ICRP Publication 26 Ann. ICRP 1 (3), 1977.

ICRP. **Recommendations of the ICRP**. *International Commission on Radiation Protection*, ICRP Publication 60 Ann. ICRP 21 (13), 1991.

ICRP. **Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values**. *International Commission on Radiation Protection*, ICRP Publication 89 Ann. ICRP 32 (3-4), 2002.

ICRP. **A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-Human Species**. *International Commission on Radiation Protection*, ICRP Publication 91 Ann. ICRP 33 (3), 2003.

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

ICRP. **Environmental Protection - The Concept and Use of Reference Animals and Plants.** *International Commission on Radiation Protection*, ICRP Publication 108 Ann. ICRP 38 (4-6), 2008.

ICRP. **Environmental protection: transfer parameters for Reference Animals and Plants.** *International Commission on Radiation Protection*, ICRP Publication 114 Ann. ICRP 39 (6), 2009.

ICRP. **Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60.** *International Commission on Radiation Protection*, ICRP Publication 119 Ann. ICRP 41 (Suppl.), 2012.

ICRP. **Protection of the environment under different exposure situations.** *International Commission on Radiation Protection*, ICRP Publication 124 Ann. ICRP 43 (1), 2014.

ICRU. **Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues.** *International Commission on Radiation Units and Measurements*, ICRU Report 46, 1992.

INTERWINNER. ***Emulation, Data Acquisition and Analysis Software for Gamma and Alpha Spectroscopy.*** ORTEC. Oak Ridge, TN, USA, 2004.

KARARLI, T. T. Comparison of the gastrointestinal anatomy, physiology, and biochemistry of humans and commonly used laboratory animals. ***Biopharmaceutics & Drug Disposition***, Wiley-Blackwell, v. 16, n. 5, p. 351–380, 1995.

KINASE, S. Voxel-based frog phantom for internal dose evaluation. ***J. Nucl. Sci. Technol.***, Informa UK Limited, v. 45, n. 10, p. 1049–1052, 2008.

KNOLL, G. F. ***Radiation Detection and Measurements.*** New York: John Wiley and Sons Inc., 2000.

KONIETZKA, R. Gastrointestinal absorption of uranium compounds – a review. ***Regul. Toxicol. Pharmacol.***, v. 71, n. 1, p. 125–133, 2015.

KRAMER, G. H.; CAPELLO, K.; STROCCHI, S.; BEARRS, B.; LEUNG, K.; MARTINEZ, N. The HML's new voxel phantoms. ***Health Phys.***, v. 103, n. 6, p. 802–807, 2012.

LE, T. Y.; HENDRIKS, A. J. Relationships between absorption efficiency of elements in mammals and chemical properties. ***Crit. Rev. Toxicol.***, v. 43, n. 9, p. 800–809, 2013.

LNHB. **Laboratoire National Henri Becquerel**. Acesso em: jul. 2016. Disponível em: <http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm>.

MAPA. Instrução normativa nº 9, de 9 de julho de 2003. **Aprova o Regulamento Técnico sobre fixação de Padrões de Identidade Qualidade de Alimentos COnpletos e de Alimentos Especiais destinados a Cães e Gatos**. *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*, 2003.

MINGOTI, S. A. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013.

MÜLLER, H.; PRÖHL, G. ECOSYS-87: a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. *Health Phys*, v. 64, p. 232–252, 1993. ISSN 0017-9078.

NIST. **Compositions of materials used in STAR database**. *National Institute of Standards and Technology*, Acesso em: nov. 2015. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl>>.

NIST. **XCOM: Photon Cross Sections Database**. *National Institute of Standards and Technology*, Acesso em: dez. 2016. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1-t.html>>.

NISTI, M. B.; SANTOS, A. J. G.; PECEQUILO, B. R. S.; MADUAR, M. F.; ALENCAR, M. M.; MOREIRA, S. R. D. Fast methodology for time counting optimization in gamma-ray spectrometry based on preset minimum detectable amounts. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, v. 281, n. 2, p. 283–286, 2009.

NUCLEONICA. **Gamma Spectrum Generator**. Acesso em: dez. 2016. Disponível em: <<http://www.nucleonica.com>>.

PADILLA, L.; LEE, C.; MILNER, R.; SHAHLAEE, A.; BOLCH, W. E. Canine anatomic phantom for preclinical dosimetry in internal emitter therapy. *J. Nucl. Med.*, v. 49, p. 446–452, 2008. ISSN 0161-5505.

PEIXOTO, P. H. R.; VIEIRA, J. W.; YORIYAZ, H.; LIMA, F. R. A. Photon and electron absorbed fractions calculated from a new tomographic rat model. *Phys. Med. Biol.*, v. 53, p. 5343–5355, 2008. ISSN 0031-9155.

PEREIRA, W. de S.; KELECOM, A.; JÚNIOR, D. de A. P. Utilização de peixes como biomonitor para fins de radioproteção ambiental em ecossistemas aquáticos continentais. um modelo conceitual. *Oecologia Brasiliensis*, v. 12, p. 542 – 552, 2008.

PEREIRA, W. de S.; KELECOM, A.; JÚNIOR, D. de A. P. Activity of natural radionuclides and their contribution to the absorbed dose in the fish cubera snapper (*Lutjanus cyanopterus*, Cuvier, 1828) on the coast of ceara, brazil. *Braz. J. Oceanogr.*, v. 58, n. spe4, p. 25–32, 2010.

PNI. **Programa Nacional de Intercomparação - PNI Avaliação de resultados. Rodadas de 1997 a 2016.** Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Acesso em: dez. 2016. Disponível em: <http://www.ird.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=249>.

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

RUEDIG, E.; CAFFREY, E.; HESS, C.; HIGLEY, K. Monte carlo derived absorbed fractions for a voxelized model of *Oncorhynchus mykiss*, a rainbow trout. *Radiat. Environ. Biophys.*, v. 53, n. 3, p. 581–587, 2014.

SAUEIA, C. H. R.; MAZZILLI, B. P.; FÁVARO, D. I. T. Natural radioactivity in phosphate rock, phosphogypsum and phosphate fertilizers in Brazil. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, v. 264, n. 2, p. 445–448, 2005.

SHEPPARD, S. C.; SHEPPARD, M. I.; GALLERAND, M.-O.; SANIPELLI, B. Derivation of ecotoxicity thresholds for uranium. *J Environ Radioact*, v. 79, p. 55–83, 2005. ISSN 0265-931X.

SHWEIKANI, R.; HASAN, M. Determination of the optimal measurement counting time and detection limit for gamma-ray spectrometry analysis. *Accredit Qual Assur*, v. 20, n. 6, p. 501–504, 2015.

STABIN, M. G.; PETERSON, T. E.; HOLBURN, G. E.; EMMONS, M. A. Voxel-based mouse and rat models for internal dose calculations. *J. Nucl. Med.*, v. 47, p. 655–659, 2006. ISSN 0161-5505.

STARKEY, M. P.; SCARSE, T. J.; MELLERSH, C. S.; MURPHY, S. Dogs really are man's best friend canine genomics has applications in veterinary and human medicine! *Briefings in Functional Genomics*, v. 4, n. 2, p. 112 – 128, 2005.

SULLIVAN, M. F. Absorption of actinide elements from the gastrointestinal tract of rats, guinea pigs and dogs. *Health Phys.*, v. 38, p. 159–171, 1980. ISSN 0017-9078.

TARANENKO, V.; PRÖHL, G.; GOMEZ-ROS, J. M. Absorbed dose rate conversion coefficients for reference terrestrial biota for external photon and internal exposures. *J. Radiol. Prot.*, v. 24, n. 4A, p. A35–A62, 2004.

ULANOVSKY, A.; PRÖHL, G. A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota. *Radiat. Environ. Biophys.*, v. 45, n. 3, p. 203–214, 2006.

ULANOVSKY, A.; PRÖHL, G. Tables of dose conversion coefficients for estimating internal and external radiation exposures to terrestrial and aquatic biota. *Radiat. Environ. Biophys.*, 47, n. 2, p. 195–203, 2008. ISSN 0301-634X.

UNSCEAR. **Sources and Effects of Ionizing Radiation, Scientific Annex B: Exposure of the public and workers from various sources of radiation.** *The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, New York, 2008a.

UNSCEAR. **Sources and Effects of Ionizing Radiation, Scientific Annex E: Effects of Ionizing Radiation on non-human biota.** *The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, New York, 2008b.

UNSCEAR. **Methodology for estimating doses to non-human biota.** *The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, New York, 2013.

USDOE. A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. *U.S. Department of Energy*, Technical Standard DOE-STD-1153-2002, 2002.

VIVES I BATLLE, J.; WILSON, R.; WATTS, S.; JONES, S.; MCDONALD, P.; VIVES-LYNCH, S. Dynamic model for the assessment of radiological exposure to marine biota. *J. Environ. Radioact.*, v. 99, n. 11, p. 1711–1730, 2008.

WELLING, P. G. *Pharmaceutical bioequivalence*. [S.l.: s.n.], 1991.

WINQXAS. *Quantitative X-ray Analysis System for MS Windows operating System, version 1.40*. International Atomic Energy Agency, 2002.

ZAMBONI, C. B.; METAIRON, S.; KOVACS, L.; MACEDO, D. V.; RIZZUTTO, M. A. Determination of Fe in blood using portable x-ray fluorescence spectrometry: an alternative for sports medicine. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, v. 307, n. 3, p. 1641–1643, 2015.

CONCENTRAÇÃO DE ATIVIDADE DE CADA AMOSTRA DE RAÇÃO OBTIDA PELO HPGE

Neste Apêndice são apresentados os dados de concentração de atividade resultantes da espectrometria gama. Os valores encontrados para os radionuclídeos naturais ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{228}Ac , ^{214}Pb e ^{214}Bi são apresentados nas TAB. A.1, A.2 e A.3 para as rações caninas e A.4 para as rações felinas.

Tabela A.1: Concentração de atividade A e respectiva incerteza σ (Bq.kg^{-1}) para cada amostra de ração canina, sendo a para animais adultos, p para filhotes.

Amostra	^{214}Pb		^{214}Bi		^{212}Pb		^{212}Bi		^{228}Ac	
	A	σ	A	σ	A	σ	A	σ	A	σ
Aa01	6,0	0,6	4,0	0,6	3,8	0,7	11,1	4,1	10,7	1,1
Aa03	3,2	0,5	1,2	0,5	< 2,3		< 15,1		3,7	0,9
Aa05	3,0	0,4	1,8	0,5	< 2,0		< 13,3		5,1	0,8
Aa06	2,8	0,4	2,3	0,4	< 1,9		< 12,4		4,3	0,8
Aa08	2,4	0,6	< 2,3		< 2,2		< 15,5		5,3	0,9
Ba01	1,8	0,5	2,7	0,7	3,4	0,6	< 15,8		6,7	0,9
Ba02	3,9	0,4	3,3	0,5	3,7	0,4	7,7	3,2	7,7	0,7
Bp03	2,5	0,4	1,2	0,5	< 2,1		< 13,2		6,2	0,8
Ba04	2,1	0,4	1,3	0,5	< 2,1		< 14,0		3,8	0,8
Ba05	5,6	0,5	4,2	0,6	3,7	0,5	< 13,5		7,8	0,8

Tabela A.2: *Continuação.* Concentração de atividade A e respectiva incerteza σ ($Bq.kg^{-1}$) para cada amostra de ração canina, sendo a para animais adultos, p para filhotes, s para idosos e w dietética.

Amostra	^{214}Pb		^{214}Bi		^{212}Pb		^{212}Bi		^{228}Ac	
	A	σ	A	σ	A	σ	A	σ	A	σ
Ba06	3,4	0,5	4,4	0,6	< 2,4		< 15,5		8,1	1,0
Ba07	5,1	0,5	2,8	0,5	< 2,2		< 15,1		11,1	1,0
Bp08	3,9	0,5	2,4	0,5	< 2,1		< 13,7		5,8	0,8
Ba09	2,2	0,4	2,4	0,5	< 2,0		< 14,3		2,4	0,7
Bs10	2,1	0,4	< 2,1		< 2,0		< 14,1		2,8	0,7
Ba11	2,7	0,5	2,1	0,5	< 2,2		< 15,4		5,1	0,8
Ca01	1,9	0,4	1,4	0,5	< 2,0		< 14,0		5,8	0,9
Ca02	2,3	0,4	< 2,1		< 2,0		< 13,8		4,8	0,8
Ca03	1,6	0,4	1,6	0,5	< 2,2		< 14,4		4,4	0,8
Ca04	< 1,9		< 2,1		< 2,1		< 14,2		< 3,6	
Da01	2,2	0,7	< 2,7		< 2,7		< 17,8		< 4,5	
Dp02	< 2,5		< 2,5		< 2,6		< 1,72		< 4,5	
Ea01	2,8	0,5	2,4	0,6	< 2,3		< 15,2		2,6	0,8
Fa01	3,4	0,5	2,1	0,5	1,2	0,5	< 12,8		3,4	0,7
Fa02	2,2	0,4	1,1	0,5	< 2,1		< 13,4		4,3	0,8
Fa03	2,5	0,5	2,7	0,6	< 2,5		< 16,6		4,3	0,9
Ga01	2,4	0,5	1,7	0,6	< 2,3		< 15,1		2,4	0,8
Gp02	1,5	0,5	< 2,2		< 2,3		< 14,4		3,7	0,8
Gp03	2,7	0,4	< 2,1		< 1,9		< 13,4		2,3	0,7
Ga04	2,1	0,5	1,6	0,6	< 2,4		< 15,7		2,3	0,8
Ga05	3,2	0,5	2,8	0,6	< 2,4		< 16,2		7,3	1,0
Ga06	2,4	0,5	1,9	0,5	< 2,2		< 15,7		6,0	0,9
Ga07	3,5	0,5	1,3	0,6	< 2,4		< 15,6		7,5	0,9
Ha01	3,1	0,5	< 2,5		< 2,2		< 13,9		5,0	0,9
Ha02	1,0	0,4	1,4	0,5	< 2,1		< 14,1		4,7	0,8
Hp05	2,0	0,5	< 2,3		< 2,4		< 15,5		2,6	0,8
Ha03	1,5	0,4	< 2,0		< 2,0		< 13,7		2,1	0,7
Hs04	1,4	0,4	1,4	0,5	< 2,1		< 13,9		2,7	0,8

Tabela A.3: *Continuação.* Concentração de atividade A e respectiva incerteza σ ($Bq.kg^{-1}$) para cada amostra de ração canina, sendo a para animais adultos, p para filhotes, s para idosos e w dietética.

Amostra	^{214}Pb		^{214}Bi		^{212}Pb		^{212}Bi		^{228}Ac	
	A	σ	A	σ	A	σ	A	σ	A	σ
Ia01	3,7	0,5	1,7	0,5	< 2,1		< 14,5		< 3,9	
Ia02	3,0	0,5	2,3	0,5	< 2,1		< 14,5		< 3,7	
Ia03	1,7	0,4	< 2,2		< 2,2		< 14,4		2,2	0,9
Ja01	1,4	0,4	< 1,9		< 2,0		< 13,4		3,5	0,9
Kw01	2,3	0,5	1,2	0,5	< 2,2		< 14,6		< 3,7	
Ks02	< 1,9		< 2,0		< 2,0		< 12,9		< 3,5	
Ls01	1,3	0,4	< 2,0		< 2,1		< 13,1		< 3,4	
La02	1,7	0,5	< 2,7		< 2,5		< 18,2		2,6	0,8
La03	0,9	0,4	0,9	0,4	< 1,8		< 11,6		3,7	0,7
La04	1,2	0,4	< 2,0		< 2,1		< 13,1		5,8	0,8
La05	2,7	0,4	< 1,9		< 1,9		< 12,5		3,7	0,7
Ma01	< 2,0		1,2	0,5	< 2,0		< 13,8		2,3	0,7
Ma02	2,4	0,4	< 2,0		< 2,0		< 12,6		3,0	0,7
Na01	< 1,8		< 1,9		< 1,9		< 12,3		< 3,1	
Np02	< 2,4		< 2,5		< 2,3		< 15,5		< 3,9	
Oa01	4,3	0,4	2,6	0,5	< 1,9		< 12,7		5,9	0,8
Os02	5,0	0,6	3,0	0,6	< 2,4		< 15,9		9,4	0,9
Oa03	2,3	0,4	1,6	0,5	< 2,1		< 13,0		3,8	0,7
Pa01	1,5	0,4	< 1,9		< 1,9		< 12,4		3,0	0,7
Pa02	< 1,9		< 2,0		< 2,0		< 13,5		< 3,5	
Pp03	1,5	0,4	< 2,1		< 2,1		< 13,2		3,3	0,7
Pa04	1,4	0,4	< 1,9		< 2,0		< 12,9		< 3,3	
Qa01	3,1	0,5	< 2,2		< 2,1		< 14,6		3,0	0,7
Ra01	2,1	0,4	1,6	0,5	< 2,2		< 14,9		3,4	0,9
Ra02	1,9	0,4	< 2,2		< 2,1		< 15,2		4,2	0,8
Ra03	< 2,1		< 2,2		< 2,1		< 14,5		5,6	0,8
Sa01	1,9	0,5	1,5	0,6	< 2,1		< 15,0		2,8	0,7

Tabela A.4: Concentração de atividade A e respectiva incerteza σ ($Bq.kg^{-1}$) para cada amostra de ração felina, sendo a para animais adultos e p para filhotes.

Amostra	^{214}Pb		^{214}Bi		^{212}Pb		^{212}Bi		^{228}Ac	
	A	σ	A	σ	A	σ	A	σ	A	σ
Aa01f	< 1,8		< 1,9		< 2,0		< 13,6		3,0	0,7
Ba01f	3,0	0,4	2,0	0,5	< 2,0		< 13,6		4,7	0,7
Ba03f	1,5	0,5	2,1	0,6	< 2,1		< 14,0		2,7	0,8
Bp02f	1,3	0,4	< 2,0		< 2,1		< 14,0		6,3	0,8
Ea01f	1,5	0,4	< 2,0		< 2,0		< 15,5		5,5	0,8
Fa01f	< 2,0		< 2,0		< 2,1		< 14,3		5,3	0,8
Ga01f	2,4	0,5	2,6	0,7	< 2,3		< 13,2		3,0	0,7
Ga02f	4,2	0,5	3,3	0,5	< 2,1		< 16,8		< 4,0	
Ha01f	1,2	0,4	1,0	0,5	< 2,0		< 15,5		< 4,0	
Ia01f	3,7	0,5	1,5	0,5	< 2,1		< 14,2		2,8	0,7
La01f	2,1	0,4	1,2	0,5	< 2,0		< 13,4		3,4	0,8
Sa01f	< 2,5		1,2	0,5	< 2,5		< 14,1		< 3,5	
Sp02f	< 2,2		< 2,3		< 2,3		< 13,3		< 3,3	

Esses dados foram inseridos nas equações discutidas do **Capítulo 3**, cujos resultados são apresentados de forma gráfica no **Capítulo 4** e nas TAB. A.5, A.6 e A.7 para as rações caninas e A.8 para as rações felinas.

Tabela A.5: *Massa, concentração de atividade A e respectiva incerteza σ ($Bq.kg^{-1}$) para cada amostra de ração canina, sendo a para animais adultos, p para filhotes, s para idosos e w dietética.*

Amostra	Massa (g)	^{40}K		^{226}Ra		^{232}Th		Total	
		A	σ	A	σ	A	σ	A	σ
Aa01	60,4	235,00	12,07	5,07	0,43	5,66	0,56	246	13
Aa03	65,0	265,70	13,09	2,23	0,35	3,73	0,86	272	14
Aa05	75,4	393,70	18,04	2,50	0,31	5,08	0,82	401	19
Aa06	78,3	265,10	12,62	2,54	0,29	4,31	0,75	272	14
Aa08	70,5	409,9	18,9	2,40	0,55	5,23	0,87	418	20
Ba01	61,1	326,50	15,73	2,12	0,39	4,39	0,51	333	17
Ba02	77,4	217,20	10,79	3,61	0,34	4,83	0,38	226	12
Bp03	71,0	295,10	14,19	1,95	0,32	6,22	0,85	303	15
Ba04	69,9	258,70	12,67	1,72	0,33	3,78	0,76	264	14
Ba05	74,6	241,00	11,76	5,01	0,38	4,86	0,45	251	13
Ba06	60,7	368,00	17,44	3,19	0,44	6,38	0,94	378	19
Ba07	68,0	404,50	18,69	4,04	0,37	11,07	1,02	420	20
Bp08	72,6	316,70	14,98	3,19	0,35	5,75	0,84	326	16
Ba09	74,4	205,00	9,54	2,30	0,31	2,36	0,73	210	11
Bs10	74,9	201,80	10,24	2,09	0,42	2,82	0,71	207	11
Ba11	70,2	303,00	14,42	2,44	0,35	5,13	0,83	311	16

Tabela A.6: Continuação. Massa, concentração de atividade A e respectiva incerteza σ ($Bq.kg^{-1}$) para cada amostra de ração canina, sendo a para animais adultos, p para filhotes, s para idosos e w dietética.

Amostra	Massa	^{40}K		^{226}Ra		^{232}Th		Total	
Ca01	74,4	241,00	11,80	1,66	0,30	5,83	0,88	248	13
Ca02	74,0	234,20	11,73	2,30	0,42	4,75	0,81	241	13
Ca03	69,2	251,50	12,44	1,59	0,32	4,38	0,82	257	14
Ca04	72,8	168,8	9,06	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	169	9
Da01	53,4	250,00	13,06	2,20	0,70	< MDA	< MDA	252	14
Dp02	65,8	284,50	14,36	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	285	14
Ea01	64,8	323,20	15,43	2,62	0,37	2,61	0,80	328	17
Fa01	75,5	305,50	14,38	2,81	0,34	1,20	0,50	310	15
Fa02	71,3	213,40	10,81	1,75	0,33	4,35	0,80	219	12
Fa03	59,2	< MDA	< MDA	2,57	0,42	4,26	0,94	7	1
Ga01	63,9	< MDA	< MDA	2,08	0,36	2,44	0,82	5	1
Gp02	65,5	267,80	13,16	1,48	0,46	3,73	0,81	273	14
Gp03	77,7	173,40	9,04	2,66	0,45	2,29	0,69	178	10
Ga04	63,1	259,20	12,86	1,89	0,37	2,30	0,79	263	14
Ga05	66,4	341,20	16,10	3,04	0,39	7,29	0,98	352	17
Ga06	68,4	326,70	15,52	2,17	0,35	5,97	0,85	335	17
Ga07	64,5	288,70	14,03	2,50	0,38	7,49	0,92	299	15
Ha01	70,7	271,20	13,38	3,09	0,46	5,00	0,92	279	15
Ha02	75,4	249,50	12,24	1,17	0,31	< MDA	< MDA	251	13
Hp05	70,4	237,40	11,78	1,40	0,31	2,72	0,84	242	13
Ha03	61,5	250,00	12,58	2,03	0,52	2,63	0,82	255	14
Hs04	72,5	232,90	11,56	1,50	0,42	2,05	0,74	236	13

Tabela A.7: Continuação. Massa, concentração de atividade A e respectiva incerteza σ ($Bq.kg^{-1}$) para cada amostra de ração canina, sendo a para animais adultos, p para filhotes, s para idosos e w dietética.

Amostra	Massa	^{40}K		^{226}Ra		^{232}Th		Total	
Ia01	72,1	191,90	10,53	2,83	0,35	< MDA	< MDA	195	11
Ia02	71,3	261,20	12,83	2,70	0,34	< MDA	< MDA	264	13
Ia03	65,9	234,80	11,87	1,73	0,43	2,24	0,86	239	13
Ja01	76,9	165,20	8,75	1,41	0,39	3,53	0,86	170	10
Kw01	66,9	250,90	12,44	1,71	0,37	< MDA	< MDA	253	13
Ks02	71,5	274,80	13,22	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	275	13
Ls01	70,9	212,90	10,80	1,31	0,42	< MDA	< MDA	214	11
La02	71,0	214,30	11,02	1,51	0,47	2,55	0,81	218	12
La03	82,9	331,20	15,25	0,90	0,27	3,66	0,67	336	16
La04	73,0	247,00	12,06	1,19	0,40	5,81	0,82	254	13
La05	78,7	253,20	12,18	2,69	0,44	3,67	0,72	260	13
Ma01	74,9	189,20	9,71	1,17	0,50	2,32	0,65	193	11
Ma02	78,1	191,80	9,74	2,39	0,43	3,04	0,74	197	11
Na01	77,3	272,50	13,03	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	273	13
Np02	78,4	273,10	13,02	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	273	13
Oa01	78,8	155,70	8,32	3,51	0,32	5,85	0,77	165	9
Os02	64,0	229,30	11,71	4,09	0,41	9,44	0,93	243	13
Oa03	74,5	179,20	9,38	2,05	0,33	3,82	0,72	185	10
Pa01	79,4	204,30	10,22	1,48	0,39	2,96	0,69	209	11
Pa02	74,6	295,10	14,05	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	295	14
Pp03	74,3	248,10	12,12	1,48	0,42	3,32	0,75	253	13
Pa04	75,5	241,30	11,78	1,43	0,38	< MDA	< MDA	243	12
Qa01	71,8	174,50	9,28	3,06	0,46	2,98	0,75	181	10
Ra01	70,6	158,50	8,70	1,89	0,32	3,40	0,89	164	10
Ra02	72,7	279,2	13,43	< MDA	< MDA	5,61	0,78	285	14
Ra03	71,8	197,4	10,23	1,89	0,43	4,17	0,81	203	11
Sa01	70,1	186,50	9,75	1,78	0,35	2,82	0,74	191	11

Tabela A.8: *Massa, concentração de atividade A e respectiva incerteza σ ($Bq.kg^{-1}$) para cada amostra de ração felina, sendo a para animais adultos e p para filhotes.*

Amostra	Massa	$K^{40}(Bq.kg^{-1})$		$Ra^{226}(Bq.kg^{-1})$		$Th^{232}(Bq.kg^{-1})$		Total($Bq.kg^{-1}$)	
	(g)	A	σ	A	σ	A	σ	A	σ
Aa01f	76,0	284,2	13,49	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	284	13
Ba01f	74,9	271,2	13,06	2,58	0,32	4,72	0,74	278	14
Bp02f	72,4	290,2	13,87	1,32	0,40	2,99	0,74	295	15
Ba03f	70,1	285,5	13,74	1,78	0,37	2,72	0,77	290	15
Ea01f	75,0	246,1	11,99	3,35	0,77	1,48	0,40	251	13
Fa01f	72,3	279,7	13,47	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	280	13
Ga01f	67,0	271,1	13,28	2,44	0,40	5,53	0,84	279	15
Ga02f	74,0	361,7	16,76	3,77	0,36	6,27	0,78	372	18
Ha01f	73,9	284,3	13,6	1,12	0,29	3,05	0,70	288	15
Ia01f	71,3	315,9	14,96	2,63	0,35	5,29	0,82	324	16
La01f	75,0	320,7	15,03	1,69	0,32	2,77	0,73	325	16
Sa01f	68,7	226,1	11,36	1,22	0,53	< MDA	< MDA	227	12
Sp02f	66,0	216,8	11,17	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	217	11

CONTAGENS OBTIDAS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS - X

Os dados das contagens obtidas na fluorescência de raios-X são mostrados a seguir em forma gráfica, para cada elemento identificado.

Figura B.2: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1332 contagens para P.

Figura B.3: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1974 contagens para S.

Figura B.4: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 10025 contagens para CI.

Figura B.5: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: contagens para K.

Figura B.6: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 31703 contagens para Ca.

Figura B.7: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 9089 contagens para Ti.

Figura B.8: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1752 contagens para Mn.

Figura B.9: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 20687 contagens para Fe.

Figura B.10: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1529 contagens para Cu.

Figura B.11: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 10564 contagens para Zn.

Figura B.12: Contagens adquiridas para cada amostra, normalizadas em relação ao maior valor: 1401 contagens para Sr.

COMPOSIÇÃO DOS TECIDOS SEGUNDO ICRU

A composição dos tecidos descritos pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas da Radiação (ICRU, 1992) para o organismo humano, citado no **Capítulo 3**, são apresentados a seguir.

Tabela A.9: *Composição elementar do tecido mole (ICRU, 1992).*

Elemento	Fração de massa (t)							Ar seco
	Tecido mole	Fígado (adulto)	Trato G.I. (intestino adulto)	Pâncreas (adulto)	Ovário (adulto)	Pulmão (adulto saudável)	Coração (4 a 18 anos)	
H	0,106	0,102	0,106	0,106	0,105	0,103	0,105	
C	0,315	0,139	0,115	0,169	0,093	0,105	0,104	1,24E-4
N	0,024	0,03	0,022	0,022	0,024	0,031	0,025	7,55E-1
O	0,547	0,716	0,751	0,694	0,768	0,749	0,757	2,32E-1
Na	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	
P	0,002	0,003	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
S	0,002	0,003	0,001	0,001	0,002	0,003	0,001	
Cl	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	
Ar								1,28E-2
K	0,002	0,003	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	