

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Nuclear
Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

Rodrigo Reis de Moura

**ESTUDO DE BIOMONITORAÇÃO PARA URÂNIO E TÓRIO APLICADO A
ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA NO CENTRO DE
DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR**

Belo Horizonte
2019

Rodrigo Reis de Moura

**ESTUDO DE BIOMONITORAÇÃO PARA URÂNIO E TÓRIO APLICADO A
ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA NO CENTRO DE
DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR**

Versão final

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares do Departamento de Engenharia Nuclear como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de Concentração: Aplicação das Radiações ao Meio Ambiente.

Projeto: Monitoramento e Impacto ambiental das Radiações.

Orientação: Prof.^a Dr.^a Maria Ângela de Barros Correia Menezes

Belo Horizonte
2019

Moura, Rodrigo Reis de.

M929e

Estudo de biomonitor para urânio e tório aplicado a análise por ativação neutrônica no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear [recurso eletrônico] /Rodrigo Reis de Moura. – 2019.

1 recurso online (xviii, 179f., enc.: il.): pdf.

Orientadora: Maria Ângela de Barros Correia Menezes.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndice: f.02.

Bibliografia: f.141-159.

1. Engenharia nuclear – Teses. 2. Análise por ativação nuclear – Teses. 3. Monitoramento ambiental – Teses. I. Menezes, Maria Ângela de Barros Correia. I. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.039(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE BIOMONITORAÇÃO PARA URÂNIO E TÓRIO APLICANDO A ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA, NO CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

RODRIGO REIS DE MOURA


Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração CIÊNCIAS DAS RADIAÇÕES.

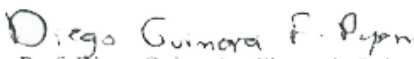
Aprovada em 11 de julho de 2019, pela banca constituída pelos membros:


Profa. Maria Ângela de Barros Correia Menezes - Orientadora
PCTN - CDTN/CNEN


Prof. Clarysson Alberto Mello da Silva
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Dr. Ricardo Gomes Passos
CDTN/CNEN


Dra. Paula Maria Borges de Salles
FACSETE


Prof. Diego Guimarães Florencio Pujoni
ICB/UFMG

Belo Horizonte, 11 de julho de 2019.

Aos mestres com carinho...

Dedico este trabalho a todos os professores, mestres e doutores que passaram pela minha vida escolar/acadêmica e que, de alguma forma, me influenciaram na busca por este caminho.

AGRADECIMENTOS

“O que a gentileza livremente oferece, agradecimentos não podem pagá-lo.” — John Masefield (1878 – 1967).

Abro essa seção agradecendo a Deus, fonte maior de energia que nos guia e fortalece a cada passo, a cada etapa vencida e principalmente a cada obstáculo suplantado, que possa se entropor, no cumprimento de nossa missão neste plano.

Meu afetuoso agradecimento aos meus pais, José Teodoro de Moura e Maria Raimunda Moura, pela vida e por me educarem tão bem em suas simplicidades. Obrigado pelos bons exemplos, pelo acolhimento sempre carinhoso e principalmente pelo amor incondicional que me tornaram o homem que sou, imperfeito na minha humanidade, mas, sabedor de que a minha missão é buscar ser sempre melhor como ser humano. Meu agradecimento a minha família (irmã e sobrinhos amados) e amigos por entenderem a minha ausência e por apoiarem a minha luta.

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), através de seu Departamento de Engenharia Nuclear por abrirem a porta para a concretização deste sonho. Ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares (PCTN), o meu muito obrigado pelo acolhimento respeitoso e pelos momentos de aprendizagem. Agradeço a todos os professores, em especial à Dr^a Cláudia Pereira Bezerra Lima, Dr^a Maria Auxiliadora Fortini Veloso, Dr. Clarysson Alberto Mello da Silva, Dr. Tarcísio Passos Ribeiro de Campos, Dr. Arno Heeren de Oliveira e Dr. Arnaldo Prata Mourão Filho. Agradeço ainda aos funcionários Aline e Tales pela competência no atendimento de nossas necessidades e pela amizade sincera. Aos meus amigos de Departamento – Cláudio Chagas, Esther Machado, Maurício Ladino, Raoni Adão, Raphael Silva e Wadia Aburjaile – obrigado pelo companheirismo ao longo desta jornada.

À CAPES, o meu muito obrigado por fomentar a bolsa de estudos que me permitiu dedicação exclusiva a este trabalho. Extensivo à FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro que me permitiu divulgar este trabalho em Congressos e Simpósios ao longo destes 4 anos.

Agradeço à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), pois este trabalho foi realizado com a total colaboração do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) através do uso das instalações e a colaboração de muitos de seus profissionais. Aproveito para agradecer a este importante centro de pesquisa e ensino na pessoa do seu diretor, o Dr. Luiz Carlos Duarte Ladeira e dos seus representantes diretos, no Setor de Análises e Meio Ambiente (SEAMA), a Dr^a. Amenônia Maria Ferreira Pinto e ao Dr. Roberto Pellacani Guedes Monteiro.

Agradeço à Dr^a. Maria Ângela de Barros Correia Menezes, orientadora e amiga. Obrigado por todo aprendizado durante o tempo de convivência e por seu exemplo de dedicação ao trabalho. Estendo este agradecimento ao Dr. Radojko Jaćimović do Institut Jožef Stefan (IJS) da Eslovênia por sua dedicação ao ensino e constante progresso da técnica de Ativação Neutrônica (Método k_0).

Agradecimentos mais que sinceros à Claudia Alves Ferreira, Paula Maria Borges de Salles e Wellington Ferrari da Silva. Amizades forjadas na rotina diária das atividades acadêmicas no CDTN e que eu levarei para sempre em minha vida. À Ana Clara Pelaes, pela descoberta de uma amiga generosa que se prontificou, com a máxima competência, a me auxiliar nas análises e cálculos de minhas amostras. Agradeço a Dr^a Lucia Auler e Maria Olívia

Cordeiro Cintra pelo entusiasmo, amizade, companheirismo e por suas inúmeras colaborações neste estudo.

Meu muito obrigado ao Flávio Fortes, Ângela Amaral, Geraldo Kastner e Wagner, profissionais dedicados e amigos queridos que auxiliaram nos procedimentos de laboratório, nas contagens de espectrometria gama e nos cálculos de atividade. À Dr^a. Helena Palmieri por abrir as portas dos laboratórios de química analítica, quando da interdição do laboratório de preparo de amostras, para a continuidade dos nossos trabalhos. À Roseli Taveira que tanto nos auxiliou com as demandas administrativas do setor. Aos profissionais e amigos Eugênio, Robson e Peter Flaming que me auxiliaram nas coletas de campo. Obrigado Dovenir, João Batista Barbosa e Tércio pelas importantes contribuições, seja na preparação das amostras de solo ou nas análises deste por meio das técnicas de difração por raio-X e microscopia eletrônica de varredura. Ao Núcleo de Pesquisa em Geotecnologias e Modelagem Ambiental, na pessoa do Dr. Paulo César Rodrigues, pela elaboração dos mapas. Ao departamento de Botânica do Instituto de Ciências Biológicas (ICB) pela colaboração na identificação das espécies utilizadas neste estudo. À Heloísa, Diva e demais funcionários do setor de Engenharia do CDTN, o meu muito obrigado pelas inúmeras colaborações em atendimento as nossas demandas junto a casa de vegetação. Ao Grupo de Estudos “Terras Raras” – Dr. Carlos Alberto de Carvalho Filho, Dra. Mônica Elizetti Freitas, Clara Ramos Possas e Victória Pinheiro de Azevedo Figueiredo – o meu muito obrigado pelas trocas de conhecimentos sempre muito estimulantes e colaborativas. Agradeço à equipe do reator TRIGA MARK I IPR-R1 – Dante, Emílio, Luiz Cláudio, Luiz Otávio e Paulo Fernando – pois sem o trabalho de vocês nada disso seria possível. Às bibliotecárias, Nívea e Virgínia pelo atendimento generoso, auxílio nas pesquisas e na organização das referências bibliográficas.

Por fim, um agradecimento póstumo, muito especial, ao educador e pesquisador Dr. Alberto Avelar Barreto, que tão cedo nos deixou, por apresentar e confiar o tema desta tese a mim.

“A maioria vive a vida no caminho que traçamos, com medo de explorar outro. Mas, de vez em quando, surgem pessoas como você, que superam todos os obstáculos que colocamos no caminho. Quem encara o livre arbítrio como dom, nunca saberá usá-lo até lutar por ele. Creio que esse é o verdadeiro plano do ‘Presidente’. E, talvez, um dia, nós não escreveremos o plano. Vocês o farão.”

(The Adjustment Bureau. Universal, 2011).

SUMÁRIO

Resumo.....	x
Abstract.....	xi
Lista de Figuras.....	xii
Lista de Quadros.....	xiv
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. Contextualização do Tema.....	19
1.2. Justificativa.....	21
1.3. Objetivos.....	22
1.3.1. Geral.....	22
1.3.2. Específicos.....	22
1.4. Estruturação da Tese.....	22
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
2.1. Radioatividade.....	24
2.2. Vias de Transferência dos Radionuclídeos.....	26
2.3. Elementos de Interesse – Urânio e Tório.....	29
2.3.1. Urânio.....	30
2.3.2. Tório.....	31
2.4. Proteção Radiológica Ambiental.....	33
2.5. Legislação Ambiental e Nuclear.....	38
2.5.1. O Licenciamento Ambiental.....	39
2.5.2. O Licenciamento de Instalação Radiativa e Nuclear.....	41
3. A BIOMONITORAÇÃO AMBIENTAL.....	44
3.1. A Biomonitoração em Estudos Ambientais.....	44
3.2. O Fator de Transferência Solo-Planta ($FT_{s,p}$).....	51
4. PROGRAMA DE MONITORAÇÃO AMBIENTAL DO CDTN.....	56
4.1. Concepção do Programa de Monitoração Ambiental.....	56
4.1.1. Objetivos do PMA/CDTN.....	56
4.1.2. As principais medições do PMA/CDTN.....	57
4.1.3. Resultados das últimas medições realizadas pelo PMA/CDTN.....	58
5. TÉCNICA ANALÍTICA.....	60
5.1. Análise por Ativação Neutrônica.....	60
5.1.1. Histórico.....	62
5.1.2. Princípio Físico.....	62
5.2. Espectrometria Gama (γ).....	64
5.3. Análise por Ativação Neutrônica no CDTN.....	65
5.4. Ativação Neutrônica pelo Método k_0	66
5.5. Reator TRIGA MARK I IPR-R1.....	70
6. ÁREA DE ESTUDO.....	73

6.1. Apresentação do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN.....	73
6.2. Caracterização Ambiental do CDTN.....	74
7. METODOLOGIA DO TRABALHO	77
7.1. Desenvolvimento da Metodologia de Trabalho.....	77
7.2. ETAPA I – Verificação da metodologia de análise da radiação natural, no meio ambiente, desenvolvida pelo PMA/CDTN.....	77
7.2.1. Métodos de coleta e preparo das amostras ambientais realizadas pelo PMA/CDTN.....	78
7.2.1.1. Coleta das amostras de solo e plantas – Metodologia do PMA/CDTN.....	80
7.2.1.2. Preparo das amostras de solo e plantas – Metodologia do PMA/CDTN.....	81
7.2.2. Métodos de coleta e preparo de amostras ambientais aplicados na verificação dos procedimentos do PMA/CDTN.....	81
7.2.2.1. Coleta das amostras de solo e plantas – Metodologia de verificação do PMA/CDTN.....	81
7.2.2.2. Preparo das amostras de solo e plantas – Metodologia de verificação do PMA/CDTN.....	84
7.3. ETAPA II – Verificação da capacidade de absorção, translocação e acumulação de Th e U pelas plantas utilizadas na metodologia de análise da radiação natural pelo PMA/CDTN em ambiente controlado.....	86
7.3.1. Ensaio I – Cultivo em Solução Nutritiva.....	87
7.3.1.1. Passos para realização do experimento.....	87
7.3.1.2. Preparo das plantas cultivadas em solução nutritiva (hidroponia).....	90
7.3.2. Ensaio II – Cultivo em Solo.....	90
7.3.2.1. Passos para realização do experimento.....	90
7.3.2.2. Preparo das plantas cultivadas em solo com teor naturalmente elevado de U e Th (INB-Caldas/MG).....	93
7.4. ETAPA III – Estabelecimento de espécie biomonitora com capacidade de absorver, translocar e acumular Th e U como complemento a metodologia de análise da radioatividade natural do PMA/CDTN.....	93
7.4.1. Ensaio I – Cultivo em Solução Nutritiva.....	94
7.4.1.1. Passos para realização do experimento.....	94
7.4.1.2. Aplicação de doses em período seco e frio.....	96
7.4.1.3. Aplicação de doses em período chuvoso e quente.....	97
7.4.1.4. Preparo das plantas cultivadas em hidroponia.....	98
7.4.2. Ensaio II – Cultivo em Solo.....	98
7.4.2.1. Passos para realização do experimento.....	98
7.4.2.2. Preparo das plantas cultivadas em solo.....	99
7.5. Análise por Ativação Neutrônica, Método k_0	99
7.5.1. Aplicação da AAN, Método k_0	100
Descarte do material utilizado nas análises e experimentos.....	103
7.6. Avaliação do desempenho do laboratório de ativação neutrônica na aplicação do método analítico.....	103
7.7. Cálculo da atividade dos radionuclídeos de interesse.....	105
7.8. Análise Estatística.....	106
7.9. Materiais Utilizados.....	107
8. RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
8.1. Avaliação de desempenho do laboratório de análise por ativação neutrônica.....	108
8.2. Análise estatística.....	108
8.3. Caracterização do Solo (INB-Caldas).....	108
8.3.1. Avaliação mineralógica do solo (INB-Caldas).....	108
8.3.2. Avaliação físico-química do solo (INB-Caldas).....	111

8.3.3. Análise da composição elementar do solo (INB-Caldas).....	112
8.4. ETAPA I – Verificação da metodologia aplicada pelo PMA/CDTN.....	112
8.4.1. Avaliação de U e Th no solo coletado pela metodologia de verificação.....	113
8.4.1.1. Solo vs. Ponto de Coleta/Sazonalidade.....	113
8.4.1.2. Solo vs. Profundidade.....	116
8.4.2. Avaliação de U e Th nas plantas coletadas pela metodologia de verificação.....	117
8.4.2.1. Planta vs. Ponto de Coleta/Sazonalidade.....	117
8.4.2.2. Planta vs. Espécie.....	119
8.4.2.3. Planta vs. Órgão.....	120
8.4.3. Fator de Transferência (FT _{s,p}).....	121
8.4.4. Avaliação comparativa das diferentes espécies do PMA/CDTN.....	122
8.5. ETAPA II – Verificação, em ambiente controlado, da capacidade de absorção, translocação e acumulação de Th e U pelas plantas utilizadas no PMA/CDTN.....	122
8.5.1. Ensaio I – Cultivo em Solução Nutritiva.....	122
8.5.2. Ensaio II – Cultivo em Solo.....	123
8.6. ETAPA III – Estabelecimento de espécie biomonitora como complemento a metodologia do PMA/CDTN.....	126
8.6.1. Tratamento Controle (Branco).....	127
8.6.2. Tratamento com Urânio.....	127
8.6.3. Tratamento com Tório.....	128
8.6.4. Absorção e distribuição de U + Th na espécie biomonitora cultivada em hidroponia ...	129
8.6.5. Absorção e distribuição de U + Th na espécie biomonitora cultivada em solo.....	132
8.6.6. Fator de Transferência (FT _{s,p}).....	133
8.6.7. Avaliação comparativa das diferentes espécies no Estudo Controlado.....	134
9. CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	136
9.1. Conclusões do Trabalho.....	136
9.1.1. Conclusões da ETAPA I – Verificação da metodologia de análise da radiação natural, no meio ambiente, desenvolvida pelo PMA/CDTN.....	136
9.1.2. Conclusões da ETAPA II – Verificação, em ambiente controlado, da capacidade de absorção, translocação e acumulação de Th e U pelas plantas utilizadas no PMA/CDTN.....	137
9.1.3. Conclusões da ETAPA III – Estabelecimento de espécie biomonitora como complemento a metodologia do PMA/CDTN.....	138
9.2. Recomendações.....	139
9.3. Trabalhos Futuros.....	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
TRABALHOS CIENTÍFICOS REALIZADOS	
ANEXO	
APÊNDICE	

RESUMO

O estudo das condições ambientais usando sistemas biológicos para quantificar elementos, sejam eles metais, radionuclídeos ou outro tipo de agente (contaminante, poluente, estressor) presente no meio ambiente, usando um organismo vivo (biomonitor), é uma estratégia que se utiliza da estreita relação existente entre o biomonitor e o meio ambiente estudado, pois o biomonitor pode fazer parte do meio ambiente e interagir com os agentes presentes nele. Assim, a biomonitoração deve ser capaz de quantificar a magnitude do estresse, caracterizar o *habitat* quanto ao grau de exposição ao agente estressor ou ainda, quanto ao grau de resposta ecológica à exposição. Devido as suas características de elevada sensibilidade, as plantas vêm sendo utilizadas como biomonitores em estudos de impacto ambiental e em vários programas de monitoração do meio ambiente. A maior parte da absorção de elementos, presentes no meio ambiente, pelas plantas é através de suas raízes. No entanto, esta absorção também pode ocorrer em contato com a atmosfera através de alguns órgãos comestíveis ou parte aérea (folhas e caule). Além disso, as plantas também têm a capacidade de translocar e acumular muitos destes elementos nas diferentes partes de sua anatomia. O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), localizado em Belo Horizonte, Minas Gerais, no Campus da Universidade Federal de Minas Gerais é uma autarquia com finalidade de pesquisa e desenvolvimento, ensino e prestação de serviços cujas atividades, envolvem o manuseio e produção de radioisótopos, tem implantado, em sua estrutura organizacional, um Programa de Monitoração Ambiental (PMA) desde 1985 – sendo Licenciada para Operar pela CNEN e o IBAMA (LO 225/2012). Visando otimizar a metodologia de monitoração ambiental, desenvolvida pelo PMA/CDTN, este estudo foi proposto em três etapas: a primeira etapa, verificação da metodologia de análise da radioatividade natural, desenvolvida no PMA/CDTN; a segunda etapa, consistiu da verificação da capacidade de absorção, translocação e acumulação das plantas utilizadas no PMA/CDTN em ambiente controlado; e a terceira etapa, consistiu no estabelecimento de um biomonitor natural para a monitoração da área do CDTN. A *Epipremnum pinatum*, planta abundante na área da instalação, foi avaliada e estabelecida, dentre as demais espécies utilizadas neste estudo, como biomonitora por apresentar as principais características esperadas para tal função. As análises para obtenção das frações mássicas e das concentrações de atividade tanto das plantas quanto do solo que as hospedam foram realizadas pela técnica nuclear, Ativação Neutrônica (Método k_0). Da Etapa 1, verificou-se que as metodologias de coleta de amostras de solo e de plantas no PMA/CDTN, podem ser otimizadas. Da Etapa 2, verificou-se que as espécies utilizadas no PMA/CDTN, em estudos controlados, tiveram bons resultados apenas no estudo em solo com concentrações naturalmente elevadas de U e Th. Da Etapa 3, verificou-se que a *Epipremnum pinatum* mostrou boa absorção de U e Th e baixa translocação para parte aérea em relação a elevada acumulação destes nas raízes. O tório mostrou-se mais biodisponível no estudo de campo. Já o urânio mostrou-se mais biodisponível no estudo controlado.

Palavras-chave: Biomonitor, Monitoração ambiental, Ativação neutrônica, Método k_0 .

ABSTRACT

The study of environmental conditions using biological systems to quantify elements, whether metals, radionuclides or another type of agent (contaminant, pollutant, stressor) present in the environment using a living organism (biomonitor), is a strategy that uses the narrow relationship between the biomonitor and the environment studied, because the biomonitor can be part of the environment and interact with the agents present in it. Thus, biomonitoring should be able to quantify the stress magnitude, characterize the habitat as to the exposure degree to the stressor or the ecological response degree to exposure. Due to their high sensitivity characteristics, plants have been used as biomonitors in environmental impact studies and in various environmental monitoring programs. Most of the elements uptake in the environment by plants is through their roots. However, this uptake may also occur in contact with the atmosphere through some edible organs or shoot (leaves and stem). In addition, plants also have the ability to translocate and accumulate many of these elements in different parts of their anatomy. The Nuclear Technology Development Centre (CDTN/CNEN), located in Belo Horizonte, Minas Gerais, at the Campus of Federal University from Minas Gerais (UFMG) is an autarchy with the purpose of research and development, teaching and provision of services whose activities involve the handling and radioisotope production, has implemented in its organizational structure an Environmental Monitoring Program (PMA) since 1985 – being Licensed to operate by CNEN (National Nuclear Energy Commission) and IBAMA (Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources), LO 225/2012. Aiming at optimizing the environmental monitoring methodology developed by PMA/CDTN, this study was proposed in three stages: the first step, verification of the methodology of natural radioactivity analysis developed at PMA/CDTN; The second stage consisted of verifying the absorption, translocation and accumulation capacity of plants used in PMA/CDTN in a controlled environment. and the third stage consisted of establishing a natural biomonitor for the monitoring of the CDTN area. *Epipremnum pinatum*, is an abundant plant in the area of the CDTN, was evaluated and established, among the other species used in this study, as a biomonitor for presenting the main characteristics expected for such function. The analyzes for obtaining the mass fractions and the activity concentrations of both the plants and the soil hosting them were performed by the nuclear technique, Neutron Activation Analysis (k_0 -Method): Step 1, it was found that soil and plant sampling methodologies in PMA / CDTN can be optimized. Step 2, it was found that the species used in PMA/CDTN in greenhouse studies had good results only in the study in soil with naturally U and Th high concentrations. Step 3, it was verified that *Epipremnum pinatum* showed good uptake U and Th and low translocation to shoot in relation to their high accumulation in the roots. Thorium was more bioavailable in the outdoor study. Uranium was more bioavailable in the greenhouse study.

Keywords: Biomonitor, Environmental monitoring, Neutron activation analysis, k_0 -Method.

LISTA DE FIGURAS
(Esquemas, Fotografias, Gráficos, Imagens e Mapas)

Figura 1: Estimativa de dose efetiva anual (mSv) proveniente tanto de fonte natural quanto de fonte artificial a que o homem está exposto.....	24
Figura 2: Porcentagem na distribuição das principais fontes de radioatividade natural/artificial e externa/interna, no mundo, a que o homem está exposto.....	25
Figura 3: Diagrama com as múltiplas vias de transferências dos radionuclídeos nos principais compartimentos do ecossistema.....	26
Figura 4: Exemplo de um ciclo de incorporação de radionuclídeos pelo homem a partir de derivados integrados a compartimentos naturais do ecossistema.....	27
Figura 5: Diagrama apresentando as séries de decaimentos radioativos naturais do ^{238}U , ^{232}Th e do ^{235}U , assim como os diferentes graus de reatividade dos radionuclídeos-filhos.....	28
Figura 6: Exemplo de absorção de ^{238}U biodisponível em solo por planta de tabaco.....	48
Figura 7: Classificação das plantas de acordo com as diferentes estratégias de absorção e acúmulo de elementos presentes nos ambientes que as hospedam.....	50
Figura 8: Visão noturna de parte das instalações do CDTN, Belo Horizonte, MG.....	56
Figura 9: Elementos com seção de choque favorável à Ativação Neutrônica.....	60
Figura 10: Elementos que formam radionuclídeos e suas respectivas meias vidas.....	61
Figura 11: Esquema ilustrado envolvendo a ocorrência da Ativação Neutrônica por decaimento.....	63
Figura 12: Esquema de contagem das energias gama nas amostras utilizando Espectrometria Gama (γ). ..	64
Figura 13: Elementos determinados por Ativação Neutrônica no CDTN.....	66
Figura 14: Imagem de arquivo do Reator TRIGA MARK I IPR-R1®.....	71
Figura 15: Foto do prédio GT (Grupo do Tório) quando ainda era IPR (Inst. de Pesquisas Radioativas) e vinculado à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1952.....	73
Figura 16: Foto do acesso principal às instalações do CDTN (2002-2018), representando a era CNEN, iniciada na década de 1990.....	74
Figura 17: Localização do CDTN em Belo Horizonte e em relação a sua vizinhança.....	75
Figura 18: Pontos de coleta das amostras ambientais do PMA/CDTN – Solo, plantas, aerossóis e vapor d’água.....	78
Figura 19: Etapas de coleta e preparo de amostras ambientais (planta e solo) executadas na metodologia de trabalho do PMA/CDTN.....	80
Figura 20: Procedimento de coleta do solo em profundidade com amostrador do tipo <i>Liner</i>	82

Figura 21: Procedimento de coleta da planta manualmente inteira – raiz e parte aérea (caule e folhas).....	83
Figura 22: Procedimentos de preparo do solo para análises física e química.....	84
Figura 23: Etapas e procedimentos de preparo das plantas para análise por ativação neutrônica.....	85
Figura 24: Etapas de coleta e preparo de amostras ambientais (planta e solo) sugeridas para metodologia de trabalho do PMA/CDTN.....	86
Figura 25: Localização (esquerda) e etapas de construção da Casa de Vegetação (direita) para realização de estudos controlados (cultivo em hidroponia e cultivo em solo) na verificação da capacidade de absorção, translocação e acumulação dos elementos de interesse pelas espécies estudadas.....	87
Figura 26: Procedimentos de preparo da solução nutritiva empregada no estudo controlado com cultivo em hidroponia para verificação da capacidade de absorção, translocação e acumulação dos elementos de interesse pelas espécies estudadas.....	89
Figura 27: Ponto de coleta das amostras de solo no Bota-fora 4 da Mina de Urânio Osamu Utsumi, INB/Caldas-MG.....	90
Figura 28: Preparo das amostras de solo coletadas no BF-4 da mina de urânio Osamu Utsumi (INB/Caldas-MG).....	91
Figura 29: Esquema dos tratamentos aplicados para verificação da capacidade de absorção pelas espécies estudadas na técnica de hidroponia.....	96
Figura 30: Etapas de execução dos experimentos para verificação da capacidade de absorção das espécies estudadas através da técnica de hidroponia.....	97
Figura 31: Etapas de desenvolvimento dos experimentos realizados em hidroponia e no solo para verificação da capacidade de absorção das espécies do PMA/CDTN e da candidata a biomonitor	99
Figura 32: Amostras pesadas e acondicionadas em seus respectivos porta amostras: PA1 (solo) e PA3 (plantas).....	100
Figura 33: Amostras acondicionadas em porta amostras maiores (Esq.) e esquema usado na irradiação (Dir.)	101
Figura 34: Etapa da espectrometria gama das amostras utilizando detectores HPGe e obtenção dos espectros utilizando-se o Gennie 2K, CANBERRA®	102
Figura 35: Aquisição dos espectros utilizando o Gennie 2K CANBERRA (Esq.) e deconvolução dos espectros no software HyperLab V.2009.1.....	102
Figura 36: Difratoograma com as fases mineralógicas caracterizadas do solo, oriundo da mina da INB-Caldas/MG, utilizado nos experimentos controlados de verificação das espécies do PMA/CDTN e de caracterização da espécie biomonitora para U e Th.	109
Figura 37: Imagem obtida através do SEM-EDS destacando o mapa para o elemento Th (cor amarela) no solo oriundo da INB-Caldas/MG e utilizados nos experimentos controlados deste estudo.....	110

Figura 38: Imagem obtida através do SEM-EDS destacando o mapa para o elemento U (cor lilás) no solo oriundo da INB-Caldas/MG e utilizados nos experimentos controlados deste estudo.....	111
Figura 39: Representação gráfica do resultado do efeito do “Ponto Amostral” em uma ANOVA 3-Way (Ponto / Profundidade / Período de coleta) na variação da fração mássica do Th e U no solo coletado nos pontos avaliados no PMA/CDTN.....	114
Figura 40: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U no solo coletado em períodos sazonais distintos no PMA/CDTN.....	115
Figura 41: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U no solo coletado em profundidades diferentes no PMA/CDTN.....	116
Figura 42: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U nas plantas coletadas nos pontos avaliados no PMA/CDTN.....	118
Figura 43: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U nas plantas coletadas nos pontos avaliados no PMA/CDTN em relação ao período sazonal.....	119
Figura 44: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U nas plantas em relação às espécies utilizadas no PMA/CDTN.	120
Figura 45: Representação gráfica do efeito da parte da planta na variação da fração mássica do Th e U encontrados nas plantas utilizados no PMA/CDTN.....	121
Figura 46: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados em ambas as partes das plantas utilizadas no PMA/CDTN em relação ao solo (INB-Caldas).....	124
Figura 47: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados nas plantas utilizadas no PMA/CDTN em relação ao solo (INB-Caldas) em períodos sazonais distintos....	125
Figura 48: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados nas plantas utilizadas no PMA/CDTN em relação ao solo (INB-Caldas) em relação à espécie.....	126
Figura 49: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados nas diferentes partes da espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN.....	129
Figura 50: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados na espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN em relação às doses aplicadas 500, 1000 e 2000 mg kg ⁻¹	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Concentração da atividade de radionuclídeos primordiais em diferentes tipos de rochas e solo (Bq kg ⁻¹).....	29
Quadro 2: Teores de U e Th em amostras de solos, em diferentes estudos pelo mundo, representados pela fração mássica (mg kg ⁻¹).....	33

Quadro 3: Concentração de radionuclídeos (Bq kg^{-1}) em alguns estudos com espécies vegetais utilizando o índice de $\text{FT}_{s,p}$	54
Quadro 4: Sais utilizados na composição da Solução Nutritiva para o crescimento das espécies submetidas ao estudo controlado em casa de vegetação (cultivo hidropônico).	88
Quadro 5: Procedimentos para preparo dos padrões de U e Th utilizados nos experimentos de absorvidade por técnica hidropônica.....	95
Quadro 6: Biblioteca com as energias dos isótopos originados a partir das reações de ativação por nêutrons térmicos no método k_0	104
Quadro 7: Abundância dos isótopos de U natural e suas respectivas meias vidas.....	105
Quadro 8: Número de átomos em 1g da amostra e a atividade dos isótopos de U natural	105
Quadro 9: Abundância do isótopo de Th natural e sua respectiva meia vida.....	106
Quadro 10: Número de átomos em 1g de amostra e a atividade do isótopo de Th natural	106
Quadro 11: Matriz comparativa das características desejadas para as espécies utilizadas no PMA/CDTN	122
Quadro 12: Matriz comparativa das características desejadas para uma espécie biomonitora em experimento controlado	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados experimentais e valores recomendados dos materiais de referência, GBW 0805 e IAEA-SOIL 7.....	108
Tabela 2: Teores de U e Th representados pela fração mássica (mg kg^{-1}) e suas respectivas concentrações de atividade (Bq kg^{-1}) do solo (INB-Caldas/MG), em triplicata, obtidos a partir da AAN, método k_0	112
Tabela 3: Avaliação da fração mássica (mg kg^{-1}) e da concentração de atividade (Bq kg^{-1}) para U e Th nas amostras de solo coletadas nos pontos de amostragem do PMA/CDTN em duas campanhas sazonais (chuvoso e seco).....	113
Tabela 4: Avaliação dos valores médios para fração mássica (mg kg^{-1}) de Th e U encontrados no solo dos pontos de amostragem do PMA/CDTN.....	114
Tabela 5: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados no solo nos pontos de amostragem no PMA/CDTN em períodos sazonais distintos.....	115
Tabela 6: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados no solo dos pontos de coleta utilizados no PMA/CDTN em diferentes profundidades.....	116
Tabela 7: Avaliação das frações mássicas e das concentrações de atividades de U e Th nas amostras de plantas coletadas nos pontos de coleta do PMA/CDTN em duas campanhas de amostragem.....	117

Tabela 8: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados nas plantas coletadas nos pontos de amostragem no PMA/CDTN.....	118
Tabela 9: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados nas plantas coletadas nos pontos de amostragem utilizados no PMA/CDTN em relação ao período sazonal.....	119
Tabela 10: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados nas plantas em relação às espécies utilizadas no PMA/CDTN.....	120
Tabela 11: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados nas plantas utilizados no PMA/CDTN em relação à bioacumulação em diferentes partes da planta.....	121
Tabela 12: Teor de Th e U (mg kg^{-1}) e concentração de atividade (Bq kg^{-1}) encontrado nas plantas usadas no experimento de avaliação da espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN.....	123
Tabela 13: Avaliação das frações mássicas (mg kg^{-1}) e concentração de atividade (Bq kg^{-1}) para padrões de U e Th no estabelecimento de espécie biomonitora como complementação a metodologia do PMA/CDTN.....	127
Tabela 14: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados na espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN.....	128
Tabela 15: Frações mássicas e concentrações de atividade do U e Th na espécie candidata a biomonitor (<i>Epipremnum pinatum</i>).....	130
Tabela 16: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados na espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN em relação às doses aplicadas 500, 1000 e 2000 mg kg^{-1}	131
Tabela 17: Teor de U e Th (mg kg^{-1}) e concentração de atividade (Bq kg^{-1}) encontrado na <i>Epipremnum pinnatum</i> , espécie candidata a biomonitor como complementação no PMA/CDTN.....	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAN	Análise por Ativação Neutrônica
AGV	Amostrador de Grande Volume
ANOVA	Análise de Variância
APG (ingl.)	<i>Angiosperm Phylogeny Group</i>
ARSAE-MG	Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais
BF-4	Bota-Fora nº4
CBTN	Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNEN-NE	Norma Experimental da Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNEN-NN	Norma Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA-MG	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CPOR	Centro de Formação de Oficiais da Reserva
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DERL/PD	Departamento de Radioproteção e Apoio ao Licenciamento/Pesquisa e Desenvolvimento
DGNAA (ingl.)	<i>Decay Gamma Neutron Activation Analysis</i>
DP	Desvio Padrão
DRS	Diretoria de Regulamentação e Segurança
DRX	Difração por Raio-X
EDTA (ingl.)	<i>Ethylenediamine Tetraacetic Acid</i>
Eh	Potencial Redox
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPA (ingl.)	<i>United States – Environmental Protection Agency</i>
ETR	Elementos Terras Raras
FT_(S,P)	Fator de Transferência Solo-Planta
FWHM (ingl.)	<i>Full width at half maximum</i>
Ge(Li)	Germânio-Lítio
GUM (ingl.)	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
HPGe (ingl.)	<i>Hiper-pure Germanium</i>
IAEA (ingl.)	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis
ICB-UFMG	Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais
ICRP (ingl.)	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
IJS (Esl.)	<i>Institut Jožef Stefan</i>
INAA (ingl.)	<i>Instrumental Neutron Activation Analysis</i>
INB-Caldas	Indústrias Nucleares do Brasil (Caldas/MG)
IPEN-Peru (Esp.)	<i>Instituto Peruano de Energía Nuclear</i>
IPR	Instituto de Pesquisas Radiativas
IUR	<i>International Union of Radioecology</i>
LAN	Laboratório de Ativação Neutrônica
LD	Limite de Detecção
LI	Licença de Instalação
LIG	Laboratório de Irradiação Gama

LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Matéria Orgânica
NaI	Iodeto de Sódio
NR	Nêutrons Retardados
NUCLEBRAS	Empresas Nucleares Brasileira
P.A.	Parte Aérea
PA	Porta-Amostra
PGNAA (ingl.)	<i>Prompt Gamma Neutron Activation Analysis</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
PMA	Programa de Monitoração Ambiental
PMRA	Programa de Monitoração Radiológica Ambiental
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PRECEND	Programa de Recebimento de Efluentes Não-Domésticos
R	Raiz
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SEM/EDS (ingl.)	<i>Scanning Electron Microscopy / Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
TRIGA (ingl.)	<i>Training, Research, Isotopes, General Atomic</i>
UNSCEAR (ingl.)	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>
UPPR	Unidade de Pesquisa e Produção de Radiofármacos

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O processo de licenciamento de uma instalação nuclear requer a orientação e o cumprimento de requisitos específicos embasados na legislação e nas normas dos órgãos responsáveis tanto pela segurança ambiental quanto nuclear do País. No Brasil, desde 1991, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), são os órgãos co-reguladores das ações referentes ao licenciamento, acompanhamento e controle de instalações nucleares e/ou radiativas no que se refere aos aspectos de controle/segurança nuclear e ambiental (ARAÚJO, 2017).

A introdução de radionuclídeos em compartimentos específicos do ambiente (atmosfera, solo, águas) pode constituir preocupação ambiental, uma vez que os radionuclídeos ao se dispersarem no meio ambiente, podem eventualmente se concentrar em quantidades consideráveis nos organismos vivos ou nos materiais inertes (REIS, 2016). Uma vez presentes nos compartimentos abióticos do ecossistema, os radionuclídeos podem se transferir, por exemplo, para as plantas, base da cadeia alimentar, por assimilação do solo; por meio da deposição atmosférica; ou por adsorção da água, no caso de plantas aquáticas (EISENBUD, 1987).

O comportamento de um determinado radionuclídeo no ecossistema costuma ser muito específico, pois depende das características físico-químicas de seus isótopos, como por exemplo, suas meias vidas (BOURDON *et al.*, 2003). O urânio e o tório são elementos químicos abundantes na natureza quando comparados com vários outros elementos. O tório que ocorre naturalmente consiste em um único isótopo radioativo, o ^{232}Th , com uma meia vida de 14.200 milhões de anos. O urânio natural consiste de três isótopos radioativos – ^{238}U (meia vida de 4.510 milhões de anos), ^{235}U (meia vida de 713 milhões de anos) e ^{234}U (meia vida de 246 mil anos) – com abundâncias relativas de 99,27%, 0,72% e 0,01%, respectivamente (BURNS e FINCH, 1999; BOURDON *et al.*, 2003).

No sistema solo-planta, esses elementos se acumulam no solo, podendo ser transferidos para as plantas via processos de remoção do solo (erosão e lixiviação) ou naturalmente, dependendo da biodisponibilidade dos elementos e da estratégia de absorção das plantas. A biodisponibilidade dos elementos se determina a partir da quantidade em que este é absorvido

pela planta do ambiente, correlacionando tais resultados com a sua concentração no tecido vegetal. Assim, um elemento é considerado biodisponível quando se encontra numa forma química em que as plantas são capazes de absorvê-lo, na forma de quelato (COZZOLINO, 1997).

Normalmente, a absorção de U e Th pelas plantas é relativamente baixa. No entanto, são reportados casos na literatura em que algumas espécies de plantas absorvem tais elementos em grandes quantidades podendo ser classificadas como biomonitores acumuladores desses elementos (REIS, 2016; IAEA, 2001; WHICKER e SCHULTZ, 1982).

No tocante à presença e ao controle de U e de Th e de seus radionuclídeos nas atividades desenvolvidas em instalações do tipo nuclear, cabe ressaltar que: a) Existe uma regulamentação para o processo de licenciamento deste tipo de instalação que fica a cargo da CNEN e está estabelecida na Norma CNEN-NE 1.04 “Licenciamento de Instalações Nucleares” (CNEN, 2002); e b) Existem condicionantes legais exigidas pelo IBAMA, que devem ser atendidas mediante a Instrução Normativa n° 1, de 23 de fevereiro de 2015 (BRASIL, 2015). Além disso, leva-se em consideração o que está disposto na Lei n° 6.938, de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981) e seu Decreto Regulamentador n° 99.274, de 6 de julho de 1990 (BRASIL, 1990), que institui a Política Nacional do Meio Ambiente e define o licenciamento ambiental como um de seus instrumentos de controle ambiental.

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) é uma instituição de pesquisa, desenvolvimento, produção, serviços e ensino com atuação na área nuclear, aplicação das radiações e outras correlatas. Localizado na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, o instituto ocupa uma área de 240.000 m², dentro do Campus da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), sendo 35.000 m² de área construída, a qual abriga, além das áreas comuns e administrativas, um reator de pesquisa (TRIGA MARK I IPR R1), laboratórios de análises (Ex.: Laboratório de Irradiação Gama – LIG) e químicas diversas, unidade de pesquisa e produção de radiofármacos (UPPR) e depósitos de rejeitos de baixa atividade.

Para atender às exigências da legislação vigente para tais atividades, o CDTN mantém, desde 1985, um Programa de Monitoração Ambiental (PMA) de forma a garantir a segurança radiológica e ambiental dentro e no entorno imediato de sua área (FERREIRA, 1985).

A credibilidade deste programa passa pela metodologia adotada nas amostragens e medições realizadas periodicamente nas suas matrizes ambientais (água, ar, efluentes, solo e

plantas). No entanto, ao longo do tempo, é preciso adequar esses procedimentos às novas situações e processos que influenciados pelas atividades da indústria nuclear possam impactar o meio ambiente e conseqüentemente a saúde humana.

No CDTN, a principal via de liberação de elementos radioativos e estáveis, ainda que considerada baixa e controlada, é por meio de efluentes líquidos. A outra forma de liberação a ser considerada, ainda mais diminuta, é a eventual fuga de material particulado para atmosfera pelas chaminés dos laboratórios. Os principais radionuclídeos potencialmente liberados por via atmosférica nas instalações do CDTN pertencem às séries do ^{232}Th e ^{238}U , além do trítio, cujas medidas das concentrações, provavelmente, contribuam para avaliação de uma maior dose anual por ingestão, inalação, ou por irradiação externa (CDTN, 2014).

Diante disso, a concessão da Licença de Operação do CDTN está associada às condicionantes requeridas pelos órgãos reguladores e fiscalizadores do meio ambiente (IBAMA) e nuclear (CNEN). Atualmente, das condicionantes que integram o processo de renovação da licença de operação da instalação, destaca-se a otimização da metodologia de monitoração das matrizes ambientais (solo e planta) e quando possível, a identificação de um biomonitor natural da qualidade ambiental para a área.

1.2 JUSTIFICATIVA

Uma grande implicação prática das considerações levantadas na contextualização desse tema é a necessidade de otimização dos processos de avaliação e controle da exposição do meio ambiente às fontes radioativas naturais e/ou antropogênicas em uma instalação nuclear. A realização de uma avaliação radiossanitária da área por meio de análise da interação entre compartimentos abióticos e bióticos, objetivando implementar práticas de sustentabilidade ambiental, na área nuclear é significativamente relevante.

O uso de biomonitores naturais, como já comprovado em outros estudos, pode garantir melhores e mais confiáveis resultados quando estudamos a quantificação e a qualificação da presença de contaminantes, tais como os radionuclídeos, nos sistemas naturais analisados. Portanto, estudos científicos envolvendo biomonitores podem se tornar base para outros estudos do comportamento destes radioelementos no sistema solo-planta, bem como na determinação de limites destes nos compartimentos naturais, garantindo maior segurança nuclear e conseqüentemente melhor proteção do meio ambiente e de todas as espécies que nele vivem.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Identificar um biomonitor vegetal para U e Th que possa ser aplicado em programa de monitoração ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN).

1.3.2 Específicos

- Determinar as frações mássicas de U e Th, assim como suas respectivas concentrações de atividade (^{238}U e ^{232}Th) nas matrizes ambientais (solo e plantas), levando em consideração fatores como o período de realização da amostragem (sazonalidade), a espécie vegetal e a profundidade do solo analisados.
- Quantificar a absorção de U e Th, pelas plantas, utilizando-se de parâmetros de transferência entre os compartimentos abiótico (solo) e biótico (plantas) por meio do cálculo do Fator de Transferência solo-planta ($FT_{s,p}$).
- Testar através de estudo controlado, em casa de vegetação, uma espécie vegetal capaz de se destacar dentre as demais plantas locais como biomonitora para presença de U e Th no ambiente.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

A presente tese encontra-se subdividida em nove capítulos, a saber:

O CAPÍTULO 1 introduz o assunto abordado e apresenta os objetivos e a justificativa para a realização do trabalho (item anterior).

No CAPÍTULO 2 apresenta-se uma revisão da literatura de relevância para a tese, incluindo temas como radioatividade, vias de transferência de radionuclídeos no meio ambiente, com destaque para o papel dos elementos de interesse (urânio e tório), proteção radiológica ambiental e os aspectos da legislação que regulamenta as atividades no âmbito ambiental e nuclear.

A caracterização da Biomonitoração, utilizando o fator de transferência solo-planta, como instrumento de estudo e a apresentação do Programa de Monitoração Ambiental do CDTN são vistos, respectivamente, nos CAPÍTULOS 3 e 4.

No CAPÍTULO 5 descreve-se a técnica analítica, Ativação Neutrônica (Método, k_0), escolhida para obtenção das frações mássicas dos elementos de interesse para posterior cálculo das suas concentrações de atividade e no CAPÍTULO 6 tem-se uma breve descrição das características ambientais da área de estudo, as instalações do CDTN.

No CAPÍTULO 7 são apresentadas, em três etapas, as metodologias aplicadas ao desenvolvimento do trabalho, tanto no campo (ambiente natural) quanto na casa de vegetação (ambiente controlado).

No CAPÍTULO 8 são apresentados os resultados obtidos nas três etapas de desenvolvimento do trabalho com ênfase numa discussão crítica e embasada em análise estatística.

As conclusões, recomendações e sugestões de trabalhos futuros são apresentados no CAPÍTULO 9.

Em seguida são trazidas as referências bibliográficas utilizadas como base deste trabalho; anexo; apêndice e os trabalhos científicos produzidos.

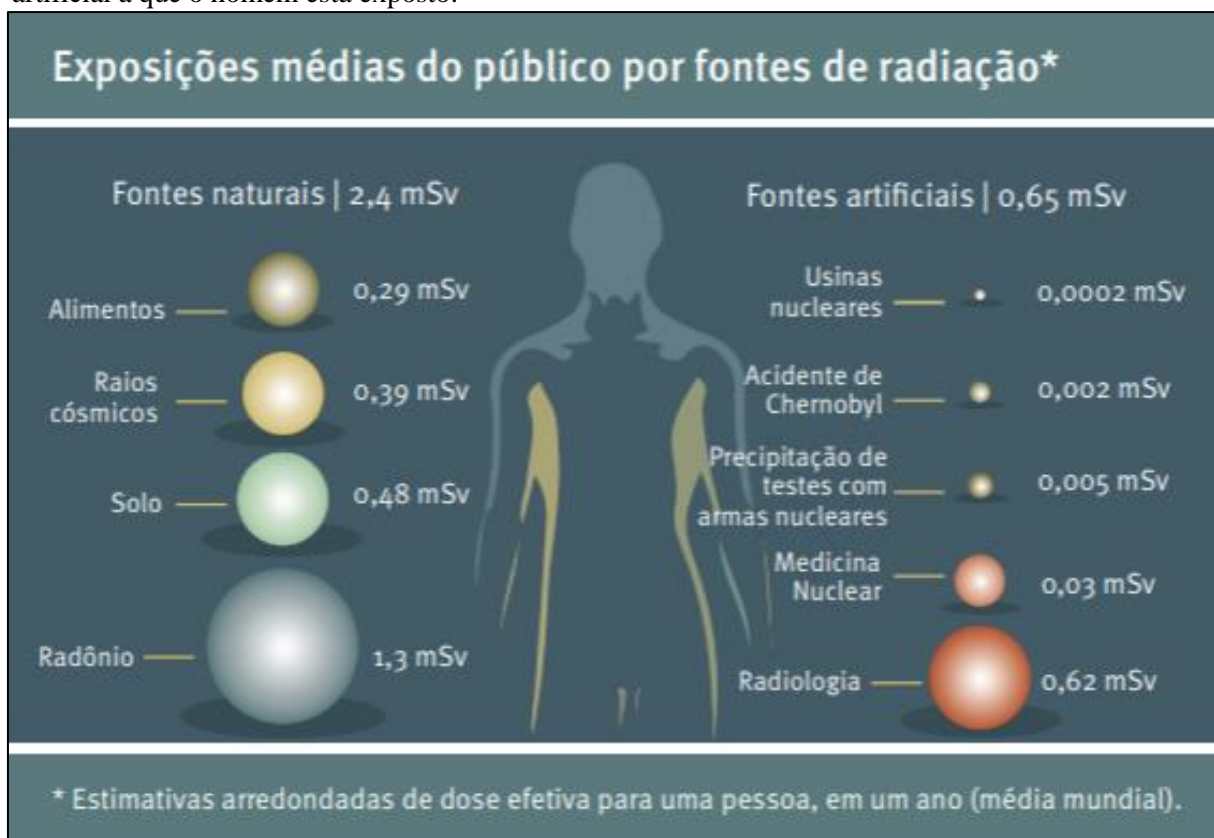
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RADIOATIVIDADE

A busca pelo conhecimento, através de estudos e medições da radioatividade no meio ambiente é necessária para o diagnóstico, controle e posterior monitoração dos níveis de radiação a que os organismos vivos possam estar expostos de forma direta e/ou indireta (PASCHOA, 2000).

A radioatividade não é totalmente proveniente das atividades antropogênicas. Pelo contrário, 80% da exposição a qual somos diariamente submetidos é oriunda da natureza e majoritariamente, o tipo mais comum de exposição a essas fontes de radiação natural é externa. O homem pode receber, em média, cerca de 2,4 mSv de dose efetiva, a cada ano, oriunda de fontes naturais (Figura 1), segundo dados da *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* – UNSCEAR (UNSCEAR, 2000).

Figura 1: Estimativa de dose efetiva anual (mSv) proveniente tanto de fonte natural quanto de fonte artificial a que o homem está exposto.



Fonte: UNEP (2016).

Segundo Aramburu e Bisbal (1994), a radioatividade natural pode ser atribuída a duas fontes principais: oriunda do cosmo (radionuclídeos cosmogênicos) e da crosta terrestre

(radionuclídeos primordiais). Uma fonte cósmica de radioatividade é aquela que se origina continuamente no espaço (raios cósmicos, radiação solar e da Via Láctea). Ela tem nos prótons de alta energia (85%), nas partículas alfa (14%) e em núcleos atômicos mais pesados (1%), seus principais representantes, podendo ainda ocorrer a geração de radionuclídeos cosmogênicos a partir das interações dessas fontes de energia com os gases presentes na nossa atmosfera (NEA, 1997). As fontes terrestres de radioatividade natural têm origem nos elementos denominados primordiais que estão presentes na formação do planeta, sobretudo a 4,5 milhões de anos na crosta terrestre. A radiação que emana do solo, da água, do ar e até dos alimentos é composta basicamente pelas séries naturais do ^{232}Th (abundância natural de 100%), ^{235}U (abundância natural de 0,72%) e ^{238}U (abundância natural de 99,27%). Além dos radionuclídeos primordiais, existem ainda aqueles radionuclídeos produzidos a partir de suas respectivas desintegrações, os quais são denominados de radionuclídeos secundários (EISENBUD, 1987). A Figura 2 ilustra, em termos percentuais, as principais fontes de radiação no mundo a que o ser humano está sujeito.

Figura 2: Porcentagem na distribuição das principais fontes de radioatividade natural/artificial e externa/interna, no mundo, a que o homem está exposto.



Fonte: UNEP, 2016.

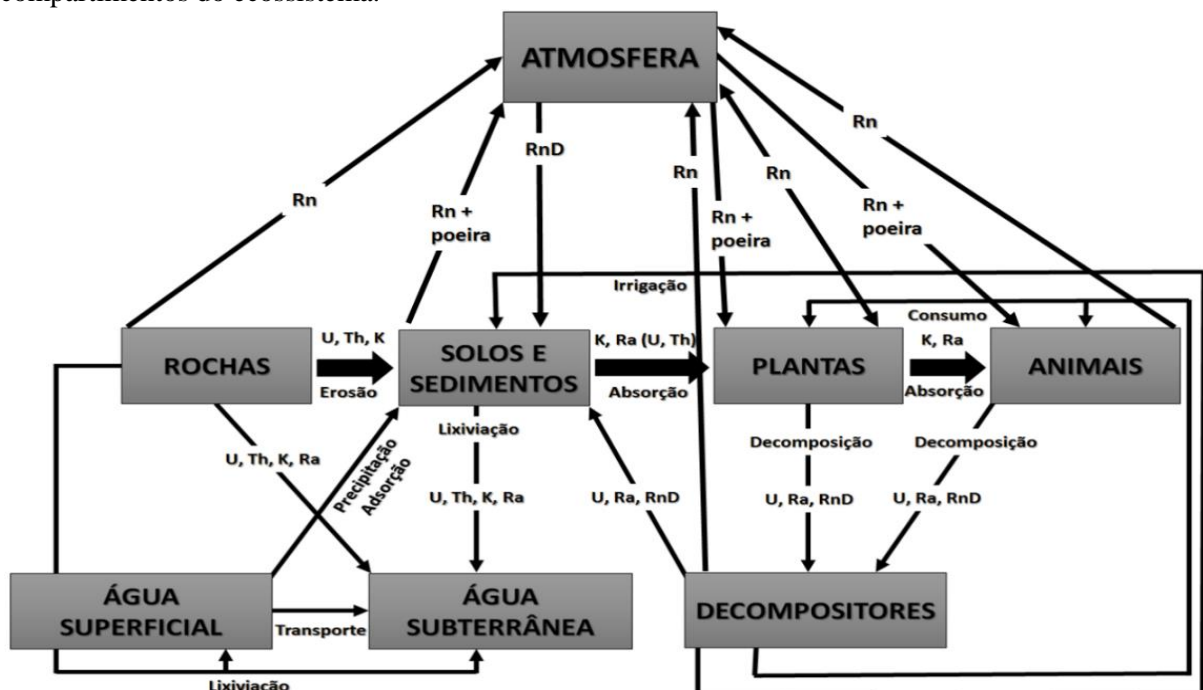
Quando um núcleo do átomo instável emite partículas alfa (α), beta (β) ou radiações do tipo gama (γ), ele perde energia. Este processo é chamado decaimento radioativo e a quantidade

de partículas emitidas em um dado período (tempo) é conhecida como atividade (A). Cada elemento radioativo, seja natural ou artificial, se desintegra a uma velocidade que lhe é particular. O tempo que cada radionuclídeo leva para ter sua atividade reduzida à metade da atividade inicial é denominado meia vida ($T_{1/2}$). Isso significa que, para cada meia vida, a atividade vai sendo reduzida à metade da anterior. A probabilidade de um núcleo decair, por unidade de tempo, é chamada constante de decaimento radioativo (λ), cuja unidade é dada em tempo^{-1} (KAPLAN, 1978; IAEA, 2010). É na busca por estabilidade que os radionuclídeos sofrem decaimento, podendo perder sua energia excedente em uma única etapa, resultando em um nuclídeo estável. No entanto, existem radionuclídeos que emitem o seu excedente de energia em etapas separadas e distintas. Nestes casos, o radionuclídeo original (pai) decai em uma série de elementos, antes do elemento radioativo resultante (filho) perder totalmente a sua energia e tornar-se estável (KAPLAN, 1978).

2.2 VIAS DE TRANSFERÊNCIA DOS RADIONUCLÍDEOS

Radionuclídeos naturais estão onipresentes no ambiente, variando consideravelmente em concentrações de atividade (SHEPPARD, 2004). A transferência desses radionuclídeos para os organismos vivos (Figura 3) ocorre por vários caminhos (compartimentos) possíveis, como, por exemplo, através da atmosfera, sistemas aquáticos e do solo, cada um contribuindo ao seu modo para exposição humana (MAZZILLI, MÁDUAR e CAMPOS, 2011).

Figura 3: Diagrama com as múltiplas vias de transferências dos radionuclídeos nos principais compartimentos do ecossistema.

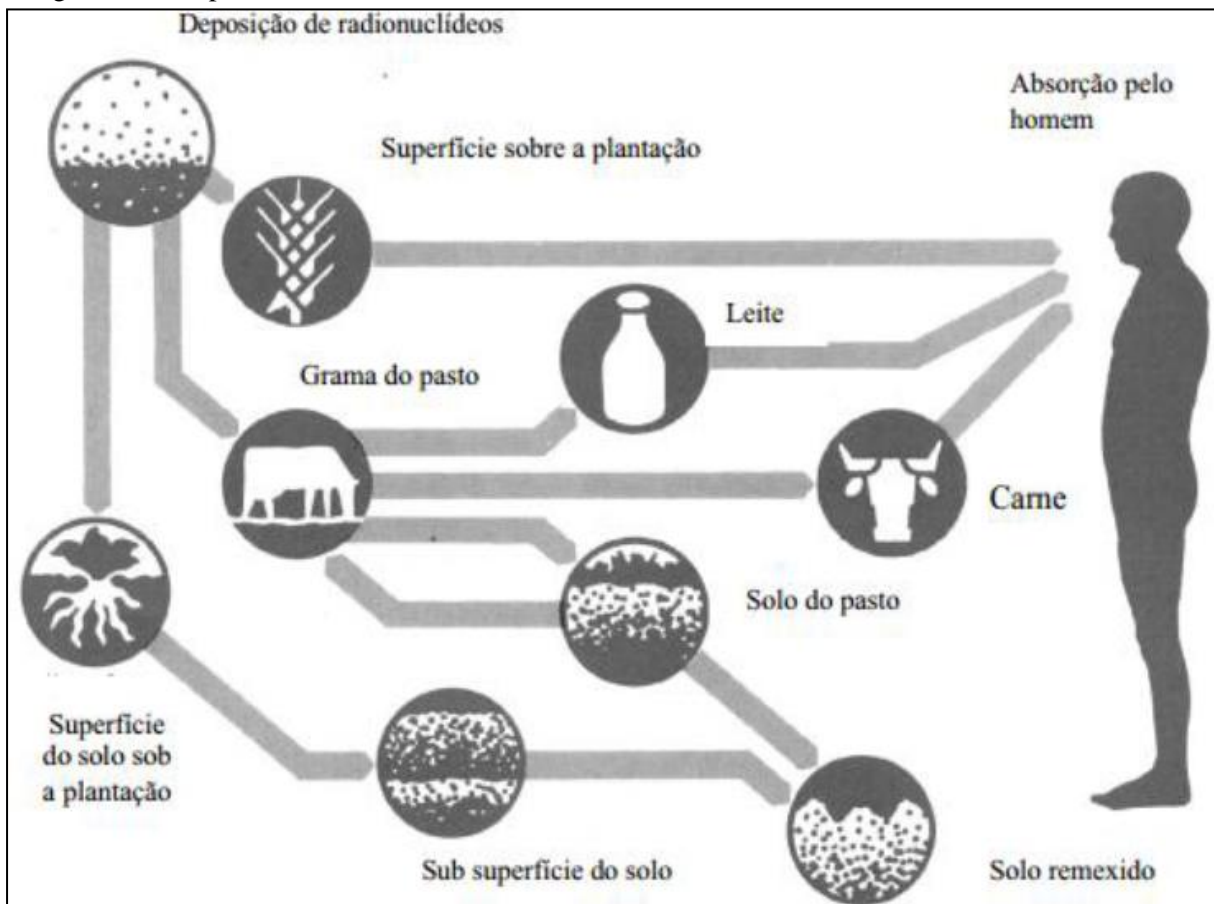


Fonte: Adaptado de MAZZILLI, MÁDUAR e CAMPOS (2011) pelo Autor (2018).

Existem também acontecimentos não planejados como os acidentes em usinas nucleares – Chernobyl em 26 de abril de 1986 e Fukushima em 11 de março de 2011 são os mais conhecidos. Portanto, parte da radiação oriunda de elementos radioativos artificiais é encontrada, atualmente, em toda a esfera terrestre devido ao *fallout*. Este fenômeno é a precipitação ou deposição de elementos radioativos na superfície terrestre. Isso acontece quando uma explosão nuclear ocorre e forma uma nuvem de gás e vapor com alta temperatura que chegam a grandes altitudes, na estratosfera e troposfera (GLASSTONG, 1964).

De uma forma geral, a incorporação dos radionuclídeos oriundos de fontes provocadas pelo homem na biosfera devido ao *fallout* atingem plantas, solo e água e, por diferentes meios, contaminam o ambiente, os alimentos, chegando até os seres humanos, como ilustrado na figura 4 (KATHNEN, 1998). Outra forma de entrada dos radionuclídeos artificiais nos compartimentos ambientais pode ocorrer através da exposição ocupacional a essas fontes nos locais de trabalho que as utilizam (UNSCEAR, 2008).

Figura 4: Exemplo de um ciclo de incorporação de radionuclídeos pelo homem a partir de derivados integrados a compartimentos naturais do ecossistema.



Fonte: KATHNEN, 1998.

Além disso, existem as séries de decaimentos longos de origem natural (ARAMBURU e BISBAL, 1994). Os nuclídeos radioativos ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th decaem por meio de três diferentes séries através de seus radionuclídeos filhos até atingir a estabilidade (Figura 5). Das séries naturais de decaimento, a do ^{235}U é a menos detectada devido à pequena porcentagem do isótopo na natureza (KAPLAN, 1978; IAEA, 2010).

Figura 5: Diagrama apresentando as séries de decaimentos radioativos naturais do ^{238}U , ^{232}Th e do ^{235}U , assim como os diferentes graus de reatividade dos radionuclídeos-filhos.

Elemento	Série U-238				Série Th-232			Série U-235		
Urânio	U-238 4,5*10 ⁹ a		U-234 245500a					U-235 7,0*10 ⁸ a		
Protactíneo		Pa-234 1,2 min							Pa-231 32800 a	
Tório	Th-234 24,1 d		Th-230 75400 a		Th-232 1,4*10 ¹⁰ a	Th-228 1,91a	Th-231 25,5 h			Th-227 18,7 d
Actíneo						Ac-228 6,1 h				Ac-227 21,8 a
Rádio			Ra-226 1600a		Ra-228 5,75 a	Ra-224 3,7 d				Ra-223 11,4 d
Frâncio										
Radônio			Rn-222 3,8 d							
Astato										
Polônio			Po-218 3,1 min	Po-214 0,00014 s	Po-210 138 d					
Bismuto			Bi-214 19,9 min		Bi-210 5,0 d					
Chumbo			Pb-214 26,8 min	Pb-210 22,3 a	Pb-206 estável		Pb-208 estável			Pb-207 estável

decaimento- α
Z: -2
N: -4

decaimento- β
Z: +1
N: +/-0

séries de
decaimento de
nuclídeos de
meia-vida curta

símbolo do
elemento

número de
massa

partículo-reactivo
baixo
intermediário
alto

Fonte: RUTGERS Van der LOEFF e VÖGE, 2001.

Nota: O tempo de meia-vida dos radionuclídeos aparece em anos, dias, horas, minutos ou segundos, abreviados como a, d, h, min, s, respectivamente.

Os radionuclídeos das séries do ^{238}U e do ^{232}Th e seus filhos estão naturalmente presentes no meio ambiente. Eles também estão associados, artificialmente, aos subprodutos e resíduos de várias atividades de mineração, processos industriais, procedimentos médicos e terapêuticos para diagnóstico, de material radioativo resultante de testes de armas nucleares e da indústria de geração de energia, inclusive por meio da energia nuclear.

Como a maioria das rochas, solos, sedimentos e minérios contêm frações mássicas significativas (Quadro 1) de urânio e tório, como consequência dos decaimentos, estes materiais

vão conter também os radionuclídeos pertencentes às suas famílias radioativas que contribuem para o aumento da concentração de atividade (OJOVAN e LEE, 2005).

Quadro 1 – Concentração da atividade de radionuclídeos primordiais em diferentes tipos de rochas e solo (Bq kg^{-1}).

TIPO DE ROCHA	^{238}U	^{232}Th
Máfica*	7-10	7-10
Silicatada*	7-10	60-80
Granítica*	40	70
Folhelho**	40	50
Carbonato**	25	8
Solos**	66	37

Fonte: OJOVAN e LEE (2005).

Nota: (*) Rochas ígneas; (**) Rochas sedimentares.

Os níveis de radiação de fundo (*background*) não são constantes e variam de 2 a 8 mSv/ano, de acordo com altitude e a geologia local (PASCHOA & GODOY, 2002). Em certos locais do mundo – Kerala e Tamilnadu, na Índia (RADHAKRISHNA *et al.*, 1993); Kalpakkam, também na Índia (KANNAN *et al.*, 2002); Morro do Ferro no estado de Minas Gerais (PENNA-FRANCA *et al.*, 1965) e a região de areia monazítica ao longo da costa do Atlântico brasileiro (PASCHOA, 2000) – ocorrem níveis elevados de tório no solo, causando um aumento na exposição à radiação natural. O responsável por grande parte desse valor é o elemento radônio, que está contido em ambientes constituídos por materiais como cerâmica, granito, argamassa, concreto, gesso, dentre outros, a partir dos quais ocorrerá o fenômeno da emissão de gás radioativo. Como ele possui o peso atômico elevado, sua concentração é maior em níveis próximos do solo, devido à decantação gravitacional. Assim, juntamente com os gases componentes do ar, o homem e os animais respiram os gases e aerossóis radioativos. As emissões do gás radônio do solo contribuem com 50% das emissões naturais. (OJOVAN e LEE, 2005).

2.3 ELEMENTOS DE INTERESSE – URÂNIO E TÓRIO

O urânio (U) e o tório (Th) são membros da série de elementos dos actinídeos. Ambos os elementos podem ocorrer na natureza no estado de oxidação tetravalente (IV) e seus íons têm raios iônicos semelhantes. Estes elementos são largamente abundantes na crosta terrestre (litófilos) quando comparados com vários outros elementos – são 40 vezes maiores que a prata e 800 vezes maiores que o ouro (BURNS e FINCH, 1999; BOURDON *et al.*, 2003).

2.3.1 Urânio

O urânio foi descoberto por Martin Heinrich Klaproth em 1789 e suas propriedades radioativas foram observadas por Antoine Henri Becquerel em 1896. O urânio é o elemento de número atômico 92 na tabela periódica e está presente naturalmente em todas as rochas e solo. O urânio possui dois estados de valência, um na forma mais reduzida, U (IV), apresenta-se geralmente contido em minerais insolúveis. Na forma oxidada, o urânio forma o íon uranila (UO_2^{+2}) e se apresenta como U (VI) podendo associar-se aos complexos de CO_3^{-2} , SO_4^{-2} e PO_4^{-3} e formar muitos minerais solúveis. A mobilidade do U (VI) é modificada pela adsorção de óxidos de ferro hidratados, argilas e coloides (FAURE e MENSING, 2005).

Os níveis de urânio no solo dependem da geologia local e variam amplamente de alguns miligramas até níveis de vários por cento (%) nos corpos minerais, com uma concentração de atividade média de cerca de 30 Bq kg^{-1} ($1,2 \text{ mg kg}^{-1}$) para o urânio em rocha e solo (UNSCEAR, 2008). O urânio é disponibilizado para o meio ambiente e atmosfera através de eventos naturais, como incêndios florestais e vulcões, e liberados da rocha e solo através de processos naturais. É distribuído através de mecanismos como lixiviação, devido a ação de águas subterrâneas e de superfície, e através da erosão eólica do solo. Por sua vez, urânio em água, solo e ar é absorvido por plantas e animais. As pessoas podem estar expostas ao urânio por inalação de partículas do ar, através da absorção pela pele e pela ingestão dele em alimentos e água (UNSCEAR, 2008).

Tanto ^{238}U quanto ^{234}U , quando em equilíbrio secular (IVANOVICH & HARMON, 1992), contribuem com 48,9% da atividade total de partículas alfa do urânio natural, enquanto ^{235}U contribui com apenas 2,2% (KETCHAM, 1996). As concentrações de urânio no meio ambiente (solo, planta, ar, água) podem ser medidas em termos de concentração de radioatividade (Bq kg^{-1}) ou de fração mássica (mg kg^{-1}) (IAEA, 2010).

Do ponto de vista geológico, o teor de urânio é relativamente baixo na rocha básica (basalto, $< 1 \text{ mg kg}^{-1}$), maior na rocha ácida (granito, $> 8 \text{ mg kg}^{-1}$) e na rocha sedimentar saturada de sílica (xisto, 4 mg kg^{-1}). A concentração de atividade do urânio no solo é de cerca de 15 Bq kg^{-1} de ^{238}U ($1,2 \text{ mg kg}^{-1}$) com uma faixa de atividade típica de $10\text{-}50 \text{ Bq kg}^{-1}$ ($0,4$ a 2 mg kg^{-1}). O teor de urânio da rocha de fosfato utilizada para fertilizantes fosfatados varia de cerca de 50 a 2.400 Bq kg^{-1} de ^{238}U ($4\text{-}190 \text{ mg kg}^{-1}$) (STOKINGER, 1981; NCRP, 1984). As frações mássicas de urânio no solo em todo o mundo têm sido relatadas para uma variação entre $0,3$ a $11,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (UNSCEAR, 1993).

A bioacumulação de urânio em plantas mostra que os fatores de concentração dependem das características do organismo (espécie, estágio de vida, fisiologia), trajetórias de exposição e as características químicas e físicas do ambiente. Whicker e Schultz (1982) relataram que as formas mais disponíveis de urânio para plantas são na forma de fosfato, carbonato, sulfato ou citrato. As concentrações de urânio nas plantas são geralmente de várias ordens de magnitude mais baixas do que no solo. Embora o urânio não tenha demonstrado ser essencial ou benéfico para o crescimento das plantas, muitos vegetais absorvem o urânio do solo em que habitam e o transloca para órgãos localizados na parte aérea (caule, folhas, flores e frutos). No entanto, o urânio concentra-se principalmente nas raízes (WHICKER e SCHULTZ, 1982; IAEA, 2001; REIS, 2016). O urânio já foi detectado, por meio de estudos de transferência, em uma variedade de culturas no Brasil (Lauria *et al.*, 1994; Vasconcellos *et al.*, 1987; Lauria *et al.*, 1998; Wasserman *et al.*, 2002; Mazzilli *et al.*, 2012). Sheppard e colaboradores, estimaram que a atividade de ^{238}U foi 100 vezes maior em tubérculos do que em vegetais folhosos e/ou frutíferos.

Efeitos macroscópicos, da presença de urânio em vegetais, têm sido descritos como redução na eficiência de biomassa de plantas e produção de sementes (SHEPPARD *et al.*, 2005) e raízes alongadas (PANDA *et al.*, 2001). A atividade fotossintética em líquens também é afetada (BOILEAU *et al.*, 1985), enquanto o estresse oxidativo e a genotoxicidade foram observados em várias espécies de plantas superiores (PANDA *et al.*, 2001; VANDENHOVE *et al.*, 2006; VANHOUDT *et al.*, 2008). Os níveis tóxicos, no entanto, variam significativamente de acordo com as espécies vegetais (AERY e JAIN, 1998; SHEPPARD *et al.*, 2005). Aery e Jain (1998) relatam um efeito na produção de sementes em *Triticum aestivum* a partir de 0,5 mg kg⁻¹ no solo, enquanto Sheppard e colaboradores não observam efeitos fitotóxicos abaixo de 1.000 mg kg⁻¹ no solo.

2.3.2 Tório

O tório, elemento de número atômico 90, foi descoberto em 1828 por Jöns Jacob Berzelius, químico sueco, e foi batizado com o nome Tório em honra do deus escandinavo Thor. Estima-se que este elemento é de 3 a 4 vezes mais abundante no planeta do que o urânio, sendo inclusive quase tão comum quanto o chumbo. As maiores fontes mundiais de tório se encontram na Índia, Austrália e Estados Unidos (BURNS e FINCH, 1999). O isótopo que se encontra na natureza é o ^{232}Th , que decai muito lentamente, com tempo de meia vida de cerca de 3 vezes a idade da Terra (BURNS e FINCH, 1999; BOURDON *et al.*, 2003). O tório é encontrado principalmente nas areias monazíticas, onde podem apresentar concentrações de até






30% misturados com fosfatos de lantanídeos, de Lantânio a Lutécio (LEE, 1980). O íon (IV) pode ser encontrado tanto no estado sólido como em solução (LEE, 1980).

Do ponto de vista da geoquímica, o tório apresenta comportamento semelhante ao urânio, podendo substituir elementos terras-raras em alguns minerais como a apatita (KABATA-PENDIAS, 2000). A mobilidade do tório é baixa, pois o ThO_2 é muito estável e pouco solúvel, além disso, seus carreadores (ex. Monazita) também são muito estáveis, o que dificulta a sua mobilidade. No entanto, a sua forma mais solúvel na natureza, o $\text{Th}(\text{SO}_4)_2^{2+}$ é formado quando o pH do ambiente é menor que 3 em condições oxidantes (De VOS *et al.*, 2006).

A absorção de tório pela planta tem sido objeto de menos pesquisas em relação ao urânio, conforme a análise de dados, sobre o tema, levantados pela *International Atomic Energy Agency* – IAEA (IAEA, 2010). Embora muitos relatos considerem urânio e tório, este último recebe menos atenção com poucos comentários sobre o seu comportamento em relação a sua absorção por plantas. Um fator importante pode ser o limite de detecção de tório que, em relatórios mais antigos, apresenta-se com valores menores que o urânio. A relativa imobilidade deste elemento pode ser também uma característica preponderante para o baixo número de dados neste tipo de pesquisa (BOURDON *et al.*, 2003).

A translocação do tório é limitada nas plantas, permanecendo as maiores concentrações nas raízes. No trigo, por exemplo, o conteúdo na raiz foi substancialmente maior que o das folhas, segundo Shtangeeva (2010). A mesma observação foi feita por Chen e colaboradores (2005) para diferentes tipos de culturas (ervilha, brassicas, milho, capim e trevo), em que foram encontradas concentrações de tório maiores em raízes do que em folhas, e por D'Souza e Mistry (1970) que relataram que as raízes retiveram 99,82% do tório absorvido em um estudo de solução nutritiva de plantas de feijão. Um conjunto substancial de dados sobre essa absorção por plantas foi produzido também por Rayno (1989) durante investigação em uma área de processamento de tório em Chicago, Illinois (USA). Isto mostrou que as concentrações nas raízes eram sempre substancialmente mais elevadas do que nas brotações para muitas plantas diferentes. No Quadro 2 são apresentados os valores da fração mássica (mg kg^{-1}) de urânio e do tório em amostras superficiais de alguns solos do mundo. Os dados demonstram que, em geral, nos solos analisados, os teores de Th são superiores aos de U, o que já foi explicado pelas características geoquímicas dos dois elementos (PÉREZ, 1998).

Quadro 2: Teores de U e Th em amostras de solos, em diferentes estudos pelo mundo, representados pela fração mássica (mg kg^{-1}).

ELEMENTO	FAIXA DE VARIAÇÃO	MÉDIA	FONTE
U	0,42 – 21,1	3,03	Xu <i>et al.</i> , (1993)
Th	0,003 – 100	13,8	
U	0,29 – 11,0	2,7	Shacklette & Boergen (1984)
Th	2,2 – 31	9,4	
U	0,72 – 2,05	1,22	Kabata-Pendias & Pendias (1985)
Th	4,2 – 14,1	8,0	
U	0,10 – 2,33	0,79	Kabata-Pendias & Pendias (1985)
Th	1,4 – 7,2	3,4	
U	0,001 – 2,298	0,872	Pérez <i>et al.</i> , (1998)
Th	0,003 – 42,09	10,20	

Fonte: PÉREZ *et al.*, 1998.

2.4 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA AMBIENTAL

A Proteção Radiológica Ambiental tem como objetivo permitir a avaliação dos níveis de radioatividade natural e artificial de forma a prevenir exposição ou contaminação a que os organismos vivos possam estar expostos, direta ou indiretamente (ICRP, 2007).

Uma das formas de avaliação é a implantação e execução de programas de monitoração ambiental nas fases pré-operacionais, operacionais e pós-operacionais (descomissionamento e pós-descomissionamento), com ênfase na avaliação de impacto radiológico em atendimento às condicionantes legais de controle (licenciamento) ambiental e nuclear, frente aos riscos de exposição por material radioativo. No Brasil, os procedimentos, os critérios científicos e metodológicos estão bem detalhados na Posição Regulatória 3.01/008:2011 da CNEN, que trata do Programa de Monitoração Radiológica Ambiental – PMRA (CNEN, 2011).

A proposição sobre a Proteção Radiológica do meio ambiente se deu a partir da publicação de nº 91 da *International Commission on Radiological Protection* – ICRP, porém,

foi somente em 2007 que ela estabeleceu claramente como objetivos dessa proteção radiológica do ecossistema a necessidade global de esforços para: i) manter a diversidade biológica; ii) assegurar a conservação das espécies; e iii) proteger a saúde e o *status* do *habitat* natural, das comunidades e ecossistemas (ICRP, 2007).

No entanto, nesta publicação, a ICRP não propõe definir os limites de dose para o meio ambiente. Ela propõe o uso de algumas espécies da fauna e da flora como referências, para estabelecer ações de proteção em diferentes situações de exposição à radiação.

Monitoração Radiológica Ambiental

A monitoração ambiental é um processo de coleta de dados, estudo e acompanhamento contínuo e sistemático das variáveis¹ ambientais, com o objetivo de identificar e avaliar, qualitativa e quantitativamente, as condições dos recursos naturais em um determinado momento, assim como as tendências ao longo do tempo (IAEA, 1996). Com base nesses levantamentos, a monitoração ambiental fornece informações sobre os fatores que influenciam o estado de conservação, preservação, degradação e recuperação ambiental da área avaliada. Também subsidia medidas de planejamento e controle do ambiente em estudo, além de auxiliar na definição de políticas ambientais. Portanto, a monitoração ambiental permite compreender melhor a relação das ações do homem com o meio ambiente, bem como o resultado da atuação das instituições por meio de planos, programas, projetos, instrumentos legais e financeiros, capazes de manter as condições ideais dos recursos naturais (equilíbrio ecológico) ou recuperar áreas e sistemas específicos (CETESB, 1999).

No âmbito da indústria nuclear, a avaliação dos impactos radiológicos no meio ambiente aponta a necessidade de planejamento e execução de um PMRA que avalie as possíveis alterações da radioatividade nos compartimentos abióticos e bióticos de uma determinada área (MAZZILLI, MÁDUAR e CAMPOS, 2011). Dessa forma, os principais objetivos de uma avaliação de impacto radiológico ambiental são:

- i. Avaliação do aumento da concentração de radionuclídeos no meio ambiente;
- ii. Avaliação quanto a transferência e acúmulo de radionuclídeos nos compartimentos naturais através de fenômenos de transporte; e

¹ Variáveis socioeconômicas e institucionais também são incluídas neste tipo de estudo, já que exercem influências sobre o meio ambiente.

- iii. Avaliação do grau de bioacumulação dos radioelementos nos compartimentos naturais, sobretudo nos compartimentos bióticos.

O Programa de Monitoração Ambiental de uma instalação nuclear é realizado em duas etapas, sendo uma dentro da instalação (preventiva) e outra externa (confirmatória). O procedimento técnico, bem como o tipo e número de medidas variam de instalação para instalação. Isto é esperado, pois além das variações determinadas pelas diferentes localizações ou ambientes de cada instalação, as monitorações são feitas com propósitos diferentes, aos quais a direção do estabelecimento dá diferentes graus de importância (IAEA, 1996). A elaboração desse programa envolve a especificação do tipo e a frequência de medidas, procedimentos de amostragem, análises em laboratório, testes estatísticos e técnicas de tratamento, assim como do registro de dados. A parte final deste programa irá envolver a estimativa da dose equivalente e a comparação com os limites máximos admissíveis recomendados pelas normas de proteção radiológica (IAEA, 1996).

Segundo Mazzilli, Máduar e Campos (2011), o programa de análise ambiental pode ser realizado em três fases distintas, porém, complementares:

a) Fase pré-operacional

Ocorre antes da instalação entrar em funcionamento. Tem como objetivo principal conhecer os níveis de radiação natural e artificial da região próxima à instalação nuclear. Outros objetivos igualmente importantes também buscados nessa fase são:

- O fator de diluição e de concentração dos radionuclídeos nas trajetórias seguidas no meio ambiente;
- A distribuição da população de acordo com a idade, sexo, hábitos alimentares, e a ocupação doméstica e recreativa nas circunvizinhanças da instalação nuclear;
- Os usos e ocupações desse ambiente pelo homem (uso agrícola, industrial e outros);
- Os grupos homogêneos na população que poderão receber as maiores doses de radiação (grupo crítico).

O tempo recomendado para realização desse programa deve ser no mínimo de 1 ano ou preferencialmente de 2-3 anos antes do início da operação da instalação e do manuseio de material radioativo. Os seus resultados devem servir como referência para comparação daqueles obtidos durante o funcionamento da instalação (MAZZILLI, MÁDUAR e CAMPOS, 2011).

b) Fase operacional

Como a própria denominação diz, ocorre durante a fase de operação da instalação e o objetivo é estabelecer a exposição real ou potencial do homem aos materiais radioativos ou radiações presentes no seu ambiente ou a estimativa dos limites superiores prováveis de tais exposições.

Após o início do funcionamento a análise ambiental da instalação nuclear deve ser feita de forma sistemática. A finalidade desse controle difere dos fins mencionados acima na fase pré-operacional; neste caso os objetivos principais são:

- Controlar as descargas de material radioativo no meio ambiente;
- Avaliar a “exposição potencial” do homem à radiação e/ou materiais radioativos eliminados pela instalação nuclear;
- Atender às condicionantes legais e outros limites operacionais;
- Possibilitar a detecção de alguma mudança no ambiente resultantes da operação da instalação;
- Verificar se os dados utilizados na avaliação pré-operacional estão sendo mantidos.

Para o cumprimento desses objetivos é necessário estabelecer um programa de análise ambiental apropriado ao tipo da instalação, às características e hábitos da região, à distribuição da população e aos tipos e quantidades de radionuclídeos cuja liberação pode ser prevista (MAZZILLI, MÁDUAR e CAMPOS, 2011).

A quantidade de medidas necessárias, sua frequência e importância dependem do programa estabelecido para cada instalação. De maneira geral, os principais tipos de medidas, sem levar em conta sua importância relativa são:

- Medida do ar atmosférico, de particulados e gases;
- Medida das condições meteorológicas do ambiente, direção e velocidade dos ventos, pluviometria etc.;
- Medida das precipitações radioativas pela atividade da chuva;
- Medida da atividade das águas de rios e córregos da redondeza;
- Medida da atividade das águas subterrâneas;
- Medida da radioatividade do solo;
- Medida da radioatividade da fauna e flora da redondeza;
- Medida da radioatividade nos alimentos consumidos pela população local.

c) Fase pós-operacional

Como a própria denominação diz, ocorre durante a fase de término das operações na instalação e os objetivos desse estágio são os mesmos das fases anteriores. Esta fase pode ser caracterizada pela intensificação das ações iniciadas nas fases pré-operacional e operacional, ou ainda, um programa diferente, dependendo das características da instalação e dos procedimentos de descomissionamento que vierem a ser adotados.

O Art. 9º que se trata no Capítulo IV da RESOLUÇÃO CNEN Nº 133, DE 8 DE NOVEMBRO DE 2012, são definidas três estratégias de descomissionamento:

- i. Desmantelamento imediato – equipamentos, estruturas e partes da usina contendo contaminantes radioativos são removidos ou descontaminados até níveis que permitam que o local seja liberado para uso irrestrito ou restrito, conforme critérios definidos ou aceitos pela CNEN. Esta estratégia implica em concluir o descomissionamento em um curto espaço de tempo e envolve a transferência do material e do rejeito radioativo para uma instalação licenciada, para seu processamento ou armazenamento ou deposição final, conforme aplicável.
- ii. Desmantelamento protelado – a usina é monitorada e mantida intacta por um período tal que permita o decaimento radioativo de itens contaminados ou ativados. Os materiais radioativos inicialmente presentes são processados ou colocados em condição tal que possam ser armazenados e mantidos em segurança durante esse período. Findo este, a usina será submetida a um desmantelamento, da mesma forma que na estratégia de desmantelamento imediato; e
- iii. Confinamento – os contaminantes radioativos são contidos em uma estrutura de material suficientemente resistente até que a radioatividade decaia para níveis que permitam que o local seja liberado para uso irrestrito ou restrito.

Diante da estratégia adotada pela instalação deve-se atender os requisitos preconizados no Art. 10º da Resolução CNEN Nº 133:

- Considerar a experiência internacional, bem como as políticas nacionais vigentes para descomissionamento e gestão de rejeitos; e
- Prever formas de gerenciar e armazenar rejeitos de todas as classes a serem gerados durante as atividades de descomissionamento.

É importante ressaltar que há ainda uma fase pós-descomissionamento que permite:

- Avaliar o nível de radiação e contaminação remanescente no meio ambiente;

- Identificar possíveis áreas onde ações corretivas sejam justificadas; e
- Manter o controle de áreas que permaneçam de uso restrito.

2.5 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E NUCLEAR

Os antecedentes históricos da legislação ambiental brasileira têm registros a partir da década de 30, especificamente nos Decretos Nº 23.793/34 (Código Florestal) e Nº 24.643/34 (Código das Águas); e na Lei Nº 24.645/34 (Lei de Proteção da Fauna).

Já as décadas de 1960 e 1970 acenam com a Lei Nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (referente ao Novo Código Florestal Brasileiro); a Lei Nº 5.197, de 3 de janeiro de 1967 (Lei de Fauna); a Lei Nº 6.225, de 14 de julho de 1975 (de combate à erosão do solo); o Decreto-Lei Nº 1.413, de 31 de julho de 1975 e o Decreto Nº 76.389, de 3 de outubro de 1975 (ambos disciplinam o controle da poluição por atividades industriais); e o Decreto Legislativo 56, apresentado em 5 de junho de 1975 (que aprova o Tratado da Antártida). Em todas elas já havia um pioneirismo em relação aos fundamentos das questões ambientais.

A integração da legislação ambiental no Brasil tal como é conhecida hoje teve reconhecidamente seu início na década de 1980, por meio de quatro marcos legislativos importantes (RODRIGUES, 2010):

- i. Aprovação da Lei Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 que instituiu a Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) – que estabelecia uma série de instrumentos para gestão ambiental que deveriam ser aplicados pelo poder público; e criou o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA²) – formado pela União, Estados, Distrito Federal e Municípios para proteger o meio ambiente e melhorar a qualidade ambiental no território nacional;
- ii. A Lei Nº 7.347/85, que tinha por premissa disciplinar a ação pública de responsabilidade pelos danos causados ao ambiente natural;
- iii. Aprovação e promulgação da Constituição da República Federativa do Brasil (1988) – lei fundamental e suprema do Brasil que abriu espaços à participação / atuação da população na preservação e na defesa do meio ambiente, impondo à coletividade o dever de defendê-lo (Art. 225) e colocando como direito fundamental de todo cidadão brasileiro a proteção ambiental determinada no Art. 5º, LXXIII (Ação Popular); e

² Reúne todos os órgãos ambientais referentes à proteção do meio ambiente no País.

- iv. A Lei Nº 9.605/98, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.

No entanto, foi a partir da Constituição Federal Brasileira de 1988 (BRASIL, 1988) que o meio ambiente ganhou um *status* de maior importância no âmbito político e legislativo. É fato que, anterior à promulgação da Constituição, o tema meio ambiente era abordado somente de forma indireta, mencionado em normas hierarquicamente inferiores (MILARÉ, 2005).

A importância do meio ambiente está na sua capacidade de oferecer a todos os seres vivos condições essenciais para a sua sobrevivência e evolução (GUIMARÃES, 2006). Essas condições, por sua vez, influenciam a saúde dos ecossistemas podendo trazer consequências para a qualidade de vida e para o desenvolvimento de uma ou mais espécies (SANTOS, 2004). Para Teixeira (2000), a degradação do meio ambiente coloca em risco direto a vida e a saúde das pessoas, individual e coletivamente consideradas, bem como a própria perpetuação da espécie humana. Daí a importância de termos um meio ambiente ecologicamente equilibrado. Assim, ninguém tem o direito de causar danos ao meio ambiente, caso contrário estaria agredindo um bem de todos, causando, portanto, danos à atual e às futuras gerações.

A Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988) destaca também em seu art. 21, inciso XXIII, a responsabilidade da União quanto a proteção da utilização da energia nuclear. A lei federal 6.453 (BRASIL, 1977) dispõe também sobre a responsabilidade civil por danos nucleares e a responsabilidade criminal por atos relacionados com atividades nucleares. É um dos mais importantes instrumentos jurídicos de garantia do uso correto e pacífico da energia nuclear. A lei federal nº 7.781 (BRASIL, 1989), que dá nova redação aos artigos 2º, 10º e 19º da Lei nº 6.189 (BRASIL, 1974), dispõe que a união exercerá o monopólio por meio da CNEN como órgão superior de orientação, planejamento, supervisão, fiscalização e pesquisa científica.

A redação do artigo 2º define então as competências da CNEN, que abrangem um amplo espectro relacionado à questão nuclear, como formulação de política, regulação, guarda de rejeitos radioativos, prestação de serviços, realização de pesquisas científicas e produção e comercialização de materiais e equipamentos (BRASIL, 1989).

2.5.1 O licenciamento ambiental

O licenciamento ambiental é um conjunto de procedimentos administrativos que visam, através dos órgãos ambientais competentes, garantir ações prévias de controle do meio ambiente, ou seja, é através desse mecanismo que são concedidas as licenças ambientais aos

empreendimentos cujas atividades produtivas efetivas são potencialmente causadoras de degradação ambiental. Esse procedimento é conduzido no âmbito do Poder Executivo, na figura de seus órgãos ambientais nas várias esferas, e advém do regular exercício de seu poder de polícia administrativa, conforme a Resolução CONAMA 237/97 (BRASIL, 1997).

O Licenciamento Ambiental foi colocado em prática pela primeira vez em 1975 e os Estados de São Paulo e Rio de Janeiro foram os pioneiros na utilização deste instrumento de controle ambiental (SOUZA, 2005). A exigência do licenciamento ambiental está amparada pela Constituição Federal Brasileira e é regulada pela legislação ordinária:

- i. A Lei nº 6.938/81, que direciona toda PNMA, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação;
- ii. A Resolução CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986, que estabeleceu diretrizes gerais para elaboração do Estudo de Impacto Ambiental - EIA e respectivo Relatório de Impacto Ambiental – RIMA nos processos de licenciamento ambiental; e
- iii. A Resolução Nº 237, de 19 de dezembro de 1997, que estabeleceu procedimentos e critérios, e reafirmou os princípios de descentralização presentes na Política Nacional de Meio Ambiente e na Constituição Federal de 1988.

O licenciamento ambiental deve ser conduzido, como determina sua concepção, de forma avaliativa e preventiva quanto aos aspectos ambientais que envolvem os empreendimentos, estejam eles em qualquer estágio (concepção, planejamento, instalação, operação e encerramento) (BRASIL, 1997).

O processo deve acontecer em etapas, por meio da concessão das licenças e acompanhamento das consequências ambientais de suas atividades (BRASIL, 1997). O Art. 8º desta mesma Resolução prevê, explícita e garante a importância dos três tipos de licença ambiental, a saber:

- Licença Prévia (LP): concedida na fase preliminar do empreendimento, contém os requisitos básicos a serem atendidos nas fases de localização, instalação e operação, os quais deverão orientar o projeto executivo;
- Licença de Instalação (LI): concedida com base no projeto executivo aprovado, autoriza o início de implantação do empreendimento; e
- Licença de Operação (LO): concedida após a verificação da compatibilidade da instalação com o previsto na LP e na LI, autoriza a operação do empreendimento.

Essas licenças ambientais, segundo parágrafo único desta Resolução, poderão ser expedidas isolada ou sucessivamente, de acordo com a natureza, características e fase do empreendimento ou atividade – elas possuem caráter provisório, uma vez que existem normas diferenciadas quanto ao prazo de validade em função das suas especificidades. Além disso, o processo de licenciamento exigirá comprovações das condições ambientais (antes, durante e depois) por meio de estudos de impacto e monitoramento permanente dos compartimentos bióticos e abióticos existentes no entorno do respectivo empreendimento (CNI, 2013).

Portanto, esse processo é efetivado perante um dos órgãos que compõem o SISNAMA. No âmbito federal (União) a competência fica a cargo do IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Art. 10, § 4º) – que conta, na maior parte dos casos, com algum órgão seccional (Estado, Distrito Federal e Município) nos casos de atividades e obras com significativo impacto ambiental de âmbito nacional ou regional (BRASIL, 1997).

Através do licenciamento ambiental, o empreendedor (pessoa física ou jurídica, de direito privado ou público constituída) se compromete atender às condicionantes ambientais, estabelecidas em lei, nos processos de implantação, ampliação, operação e descomissionamento do empreendimento sob sua responsabilidade. O cumprimento das condicionantes ambientais, após a expedição de uma licença, deve ser acompanhado de forma sistemática e cobrado tanto no âmbito administrativo quanto jurídico e a frequência desse acompanhamento é variável em função da natureza da atividade e da implementação de seus respectivos cronogramas (BRASIL, 1997). Assim sendo, uma licença ambiental pode ser concedida, renovada, suspensa ou cancelada de acordo com o atendimento ou não das condicionantes nela estabelecidas.

Portanto, espera-se que o licenciamento ambiental seja um processo idôneo e livre de protecionismos político e/ou financeiro, sendo a licença, de fato, concedida àqueles empreendedores que cumpram satisfatoriamente todos os requisitos legais exigidos para manutenção da “melhor qualidade ambiental possível” diante do impacto gerado pelas atividades do empreendimento (SANTOS, 2004).

2.5.2 O licenciamento de instalação radiativa e nuclear

A finalidade do licenciamento nuclear é inspecionar e controlar as instalações e atividades envolvendo materiais nucleares e radioativos. Além disso, o licenciamento nuclear garante o uso seguro da energia nuclear e das radiações ionizantes, visando proteger os trabalhadores e o público em geral, bem como preservar o meio ambiente (CNEN, 2017).

A Instrução Normativa nº 1 de 23 de fevereiro de 2016 da CNEN estabelece os procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades destinados a pesquisar, lavrar, produzir, beneficiar, transportar, armazenar e dispor material radioativo, em qualquer estágio ou que utilizem energia nuclear em qualquer de suas formas e aplicações, mediante parecer da CNEN (CNEN, 2016).

Sendo assim, as normas CNEN-NE-1.04 e CNEN-NN-6.02 (BRASIL, 2002; BRASIL, 2014) estabelecem, por meio da Diretoria de Regulamentação e Segurança (DRS), avaliações e verificações das condições de segurança de uma instalação nuclear, radiativa ou depósitos de rejeitos radioativos concedendo, modificando, limitando, prorrogando, suspendendo ou revogando uma licença ou autorização de construção ou operação de instalação radiativa e/ou nuclear no país, cujas atividades nelas executadas:

- i. Utilize, produza, processe, armazene ou distribua fontes radiativas seladas e / ou fontes não-seladas;
- ii. Utilizem de equipamentos geradores de radiação ionizante;
- iii. Instalações radiativas com a finalidade de produzir radioisótopos.

Portanto, o processo de licenciamento de instalações nucleares engloba duas etapas: i. o atendimento às exigências de órgãos de licenciamento ambiental (IBAMA); e ii. o atendimento às exigências de órgãos de licenciamento nuclear (CNEN) (LUQUETTI & CARVALHO, 2004).

A competência do IBAMA nesse cenário restringe-se às atividades e aos processos radioativos, seguido de um parecer técnico prévio à expedição da licença ou autorização ambiental dado pela CNEN. A competência dos demais órgãos do SISNAMA se limita ao licenciamento das atividades não radioativas do mesmo empreendimento.

Neste contexto, insere-se o CDTN que é classificado, mediante suas atividades, como uma instalação radiativa e nuclear. Na concepção da CNEN, uma ‘Instalação Nuclear’ é a instalação na qual o material nuclear é produzido, processado, reprocessado, utilizado, manuseado ou estocado em quantidades relevantes e ‘Instalação Radiativa’ é qualquer estabelecimento ou instalação, devidamente representada por pessoa jurídica, que utilize, produza, processe, distribua ou armazene fontes de radiação. No que se refere ao licenciamento de uma instalação nuclear – norma CNEN NE 1.04 (BRASIL, 2002) – envolve a solicitação pelo requerente, e a emissão pela CNEN, de atos administrativos para aprovação de material nuclear e a operação do reator. No tocante ao objetivo de estabelecer os requisitos para o

licenciamento de instalações radiativas, a Norma CNEN NN 6.02 (BRASIL, 2014) é aplicada subdividindo-se em: instalações que utilizam fontes seladas; instalações que utilizam fontes não seladas; instalações que utilizam equipamentos geradores de radiação ionizante; e instalações para produção de radioisótopos, e classificam-se, segundo a gradação do risco, em oito grupos e subgrupos, conforme o disposto no ANEXO.

3 BIOMONITORAÇÃO AMBIENTAL

3.1 A BIOMONITORAÇÃO EM ESTUDOS AMBIENTAIS

O estudo das condições ambientais usando sistemas biológicos é chamado de biomonitoração e esta pode ser considerada como uma das técnicas mais comuns de investigação do meio ambiente. É a possibilidade de medir elementos, sejam eles metais, radionuclídeos ou outro tipo de agente (contaminante, poluente, estressor) presente no meio ambiente, usando um organismo vivo, 'biomonitor' (MARKERT, 1993).

A vantagem de se executar uma biomonitoração é devido à estreita relação que existe entre o biomonitor e o meio ambiente estudado, pois o primeiro pode fazer parte do segundo e interagir com os agentes presentes nele (WOLTERBEEK *et. al.*, 1995). No entanto, as medições físicas no biomonitor, apesar de precisas, necessitam ser interpretadas mediante um número complexo de fatores que atuam sobre o ambiente em seu entorno. Normalmente, as medições físicas no biomonitor são interpretadas à luz de experimentos sob condições controladas de laboratório ou casa de vegetação, onde se avalia a relação 'dose vs resposta'. No entanto, as condições controladas, raramente, poderão extrapolar as condições de campo, já que o efeito de um poluente sobre um organismo varia enormemente em função dos elementos ambientais, que podem provocar efeitos sinérgicos, aditivos ou antagônicos (MARKERT, 1993). O biomonitor é de uma forma mais ampla, um indicador da característica do ambiente que, quando medida, quantifica a magnitude do estresse, caracteriza o *habitat* quanto ao grau de exposição ao agente estressor ou ainda, quanto ao grau de resposta ecológica à exposição (HUNSAKER; CARPENTER, 1990; McCORMICK e NIEDERLEHNER, 1993).

De acordo com Cairns e colaboradores (1993), o número de biomonitores potenciais pode ser infinito. No entanto, a seleção de um bom biomonitor não é tão simples. Isto é devido ao fato de os biomonitores serem organismos vivos que possuem diferentes capacidades de acúmulo de diferentes substâncias quando usados para o monitoramento ambiental. O acúmulo de um contaminante se inicia a baixos níveis e aumenta exponencialmente, mantendo-se estável após o nível de saturação (MARKET, 1993).

Já Hacker e Neufeld (1992) destacaram que os biomonitores têm que ser empregados com cautela, verificando sua capacidade de resposta às condições (variações) ambientais e obedecendo a certos requisitos quanto ao seu uso.

Segundo Johnson e colaboradores (1993), um biomonitor 'ideal' deve possuir as seguintes características:

- Ser taxonomicamente bem definido e facilmente reconhecível mesmo por não especialistas;
- Apresentar distribuição geográfica ampla (possibilitando comparações);
- Ser abundante ou de fácil coleta para ensaios biológicos e químicos;
- Ter baixa variabilidade genética e ecológica (não deve ser sazonal);
- Preferencialmente possuir porte pequeno a mediano; e
- Ter possibilidade de uso em estudo controlado (laboratório e/ou casa de vegetação).

Os biomonitores podem ser espécies, grupos de espécies ou comunidades biológicas (microorganismos, fauna e flora). Suas funções vitais se correlacionam tão estreitamente com determinados fatores ambientais, que estes podem ser empregados como indicadores na avaliação de uma determinada área. Os mais utilizados são aqueles capazes de diferenciar entre oscilações naturais (mudanças fenológicas, ciclos sazonais de chuva e seca) e estresses antrópicos (CALLISTO *et al.*, 2005).

Dentre os organismos reconhecidamente utilizados como biomonitores, destacam-se os líquens, os musgos e certas plantas superiores, que podem apresentar alterações típicas nas folhas, perdas foliares, redução de crescimento, alterações nos padrões de floração, ou ainda, alterações na frequência e abundância de populações quando expostas à poluição ou acumular elementos químicos biodisponíveis no ambiente em que habitam (KLUMPP *et al.*, 1996; KRUPA e LEGGE, 1999; SCERBO *et al.*, 1999; KLUMPP *et al.*, 2003; CARNEIRO e TAKAYANAGUI, 2009).

A utilização de organismos vivos como indicadores ambientais vem de longa data. No entanto, o termo biomonitor começou a ser utilizado mais frequentemente a partir dos anos 1960 (LIMA e CAVALLI-MOLINA, 2001). Durante a Revolução Industrial (Séculos XVIII e XIX), canários eram colocados dentro de minas de carvão para monitorar a qualidade do ar. Caso o canário sofresse alguma alteração desfavorável, causada por altas concentrações de monóxido de carbono, as pessoas eram imediatamente retiradas do local, evitando possíveis danos à saúde (CAIRNS Jr. e PRATT, 1993).

Matsuura (2000) divide os biomonitorios como ‘não específicos’ (quando a mesma reação pode ser provocada por diferentes fatores antrópicos), e ‘específicos’ (quando somente um fator ambiental provoca uma reação).

Lima *et al.* (2000) diz que se o biomonitor reage modificando seu comportamento com um desvio significativo em relação ao comportamento normal, então ele é um ‘biomonitor sensível’; se ele, ao contrário, acumula influências antrópicas sem, contudo, mostrar danos passíveis de serem reconhecidos em um curto espaço de tempo, ele é denominado ‘biomonitor acumulativo’.

Ambos biomonitorios podem ser encontrados entre organismos testes, monitores e indicadores ecológicos. Organismos monitores são geralmente empregados em metodologias que monitoram condições ambientais e que fornecem informações necessárias ao controle aplicado da poluição (LIMA *et al.*, 2000). Estes se utilizam de dois procedimentos distintos: ‘monitoração passiva’ e ‘monitoração ativa’ (DOMINGOS *et al.*, 1998; CALLISTO *et al.*, 2005).

Diante do procedimento utilizado no estudo ambiental, os biomonitorios podem ser classificados como passivos, quando são encontrados naturalmente na área (ecossistema) de pesquisa, em que ocorre um estudo diretamente no local, ou coletam-se amostras do material para posterior análise em estudo controlado. São chamados de ativos quando são introduzidos padronizadamente no ambiente a ser investigado (TEMMERMAN *et al.*, 2004).

São as seguintes vantagens no uso de biomonitorios em estudos ambientais (LOUZADA, 2001):

- Atestar o impacto da poluição sobre um ecossistema;
- Demonstrar a distribuição espacial e temporal do impacto;
- Fornecer dados sobre um potencial risco para a flora, fauna e população humana;
- Baixo custo de instalação e acompanhamento;
- Ausência de aparelhos sofisticados;
- Eficiência no monitoramento de áreas amplas e períodos prolongados;
- Viabilidade de se avaliar elementos químicos presentes em baixas concentrações no ambiente em estudo;
- Detecção de efeitos dos poluentes presentes no ambiente que abriga o organismo monitorado;

- Criação de um inventário de respostas à poluição.

Para estudos de possíveis plantas como biomonitores, uma técnica muito utilizada é a hidroponia. É uma técnica para o crescimento das plantas (cultivo) em uma solução de água e de nutrientes nela diluídos. Neste tipo de cultivo as raízes são suportadas por um meio que não é solo. A água é portadora dos nutrientes, uma mistura ideal de macro e de microelementos. Essa mistura é essencial para as necessidades da planta que absorve os nutrientes. Quando necessário, os nutrientes e oxigênio (via mecânica) são repostos. Há, assim, o estímulo do crescimento da planta enquanto são controladas as quantidades de água, sais minerais e oxigênio dissolvido (BEZERRA NETO e BARRETO, 2000).

Essa técnica com fins científicos tem como importantes características a aplicação de reagentes químicos com elevado grau de pureza e o uso de água destilada ou deionizada, além de exigir um maior rigor no controle de fatores como pH, condutividade elétrica e período de substituição das soluções nutritivas (BEZERRA NETO e BARRETO, 2000).

Os biomonitores não são capazes de substituir plenamente outros métodos, como estimativa da taxa de emissão ou medidas de concentrações ambientais do poluente (KLUMPP, 2001).

A maior dificuldade em estudos com a utilização de biomonitores consiste em identificar se a resposta do organismo está relacionada às variações naturais do ambiente ou se é decorrente de alterações de origem antropogênica (LOUZADA, 2001). Para que se possa diferenciar o estresse natural do estresse de origem antrópica deve-se, portanto, considerar alguns pressupostos em relação ao biomonitor utilizado, tais como (ARNDT e SCHWEIZER, 1991):

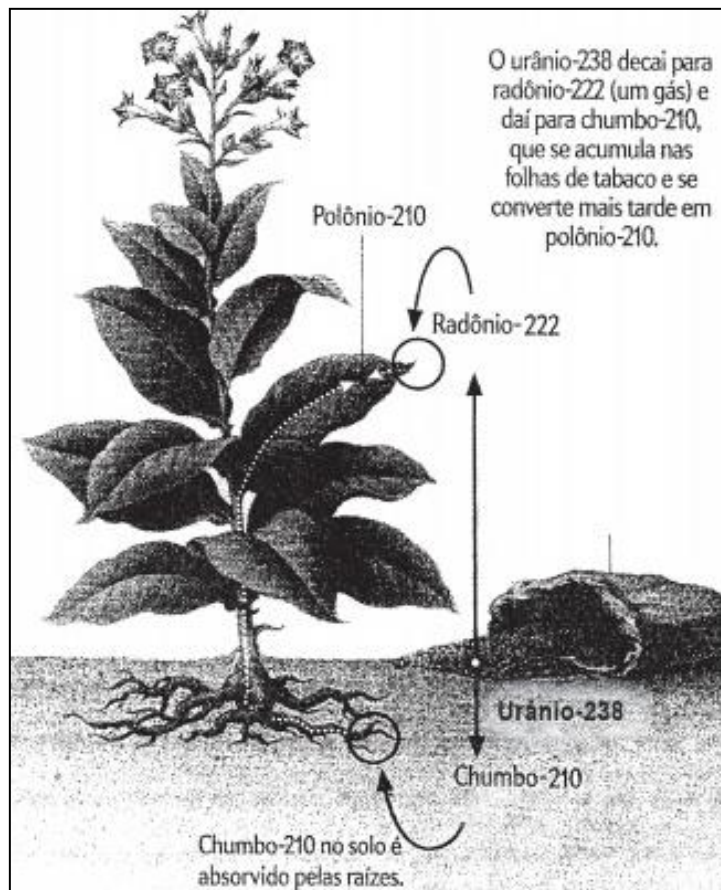
- O conhecimento da dinâmica espaço e tempo do organismo ou da comunidade analisada;
- O conhecimento de suas relações inter e intraespecíficas;
- Os fatores limitantes;
- A tolerância dos organismos.

Inicialmente, o pesquisador precisa caracterizar e conhecer os organismos que estão ocorrendo no ambiente, bem como sua variação temporal. Esta caracterização deve levar em consideração as variações naturais.

Plantas como biomonitores em estudos ambientais

As plantas têm a capacidade de absorver todos os elementos presentes no solo que as hospeda (Figura 6). No entanto, alguns deles são essenciais para o desenvolvimento e sobrevivência da planta, enquanto outros são usados apenas em níveis traços.

Figura 6: Exemplo de absorção de ^{238}U biodisponível em solo por planta de tabaco.



Fonte: Adaptada de KABATA-PENDIAS e PENDIAS (1992).

Devido as suas características de elevada sensibilidade, as plantas vêm sendo utilizadas como biomonitores em estudos de impacto ambiental e em vários programas de monitoração no Brasil (PRADO-FILHO, 1993; ALVES 1995; DOMINGOS *et al.*, 1998; BATALHA *et al.*, 1999; FERREIRA *et al.*, 2000; GUIMARÃES *et al.*, 2000; LIMA *et al.*, 2000; ALVES *et al.*, 2001; ALVES, 2001; BUJOKAS, 2001; CHAVES *et al.*, 2002; DOMINGOS *et al.*, 2002; MORAES *et al.*, 2002; ALVES *et al.*, 2003; KLUMPP *et al.*, 2003; SILVA *et al.*, 2005a, SILVA *et al.*, 2005b; MARANHO *et al.*, 2006; NAKAZATO, *et al.*, 2016; GALHARDI *et al.*, 2017a; GALHARDI *et al.*, 2017b).

Em monitoração ambiental diz-se que a amplificação biológica ou biomagnificação se refere a um aumento da concentração de determinados elementos e compostos químicos nos compartimentos abióticos, à medida que estes tornam-se biodisponíveis na cadeia alimentar, devido à assimilação pelos organismos vivos (compartimentos bióticos) (BRAGA *et al.*, 2005).

A maior parte da absorção de elementos pelas plantas (influxo) é através das raízes em contato com a rizosfera, uma região de absorção no solo. No entanto, esta absorção também pode ocorrer em contato com a atmosfera através de alguns órgãos comestíveis ou parte aérea (folhas e caule), em menor proporção pelo ar, poeira e água. Além disso, as plantas também têm a capacidade de translocar e acumular muitos destes elementos nas diferentes partes de sua anatomia (ICHIHASHI, 1990).

Alguns fatores ambientais podem influenciar na absorção de elementos pelas plantas tais como: a biodisponibilidade dos elementos no solo, especificamente na rizosfera; os complexos associados para as frações mineralógicas; as características físico-químicas de influência – salinidade, matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), potencial redox (Eh) e capacidade de troca catiônica (CTC). O equilíbrio entre as concentrações elementares em compartimentos tais como o solo pode ser influenciado por agentes externos, e isso refletirá na sua absorção pelas plantas. Assim os elementos químicos podem ser biodisponíveis, de diferentes maneiras para plantas de espécies diferentes e até mesmo para aquelas de mesma espécie (GRENGER, 1999).

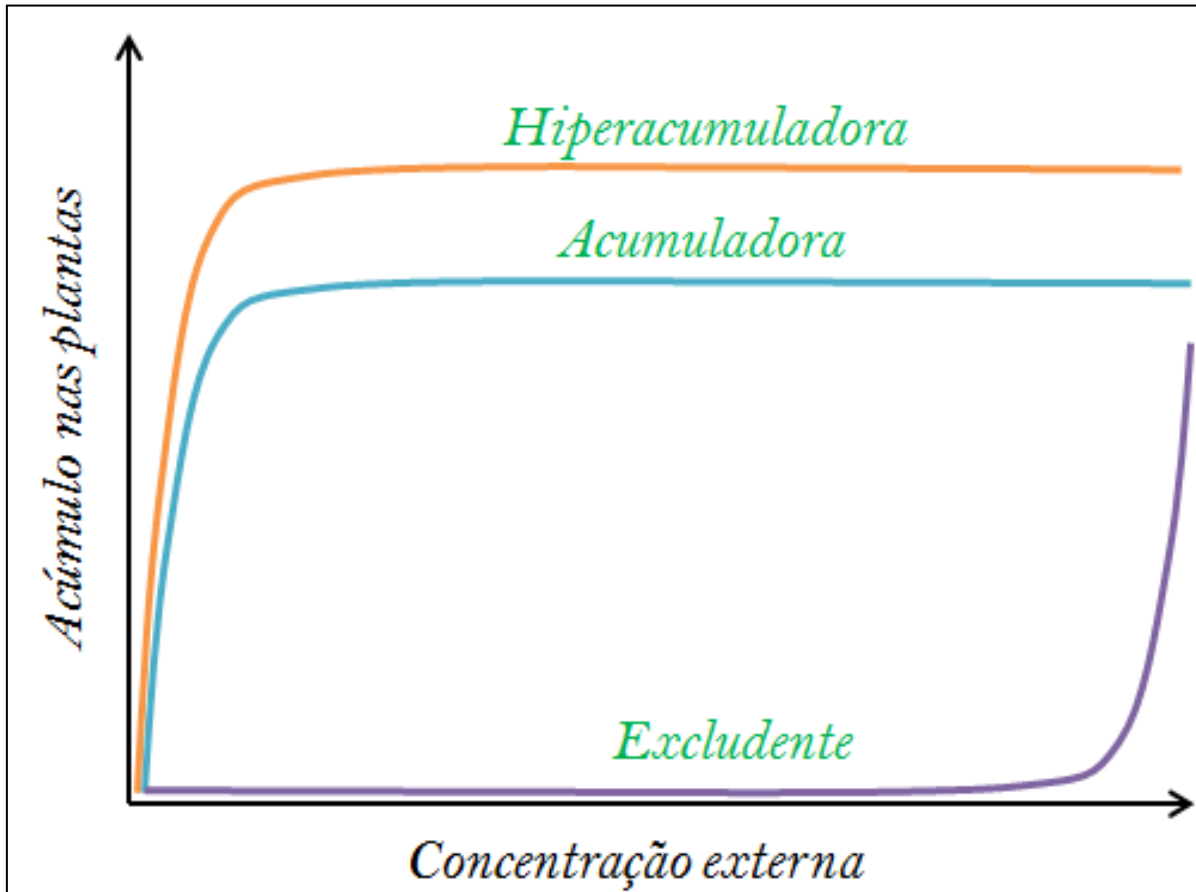
Muitos fatores ambientais podem influenciar a absorção de elementos por uma espécie de planta singular, porém, existem estudos que destacam também a influência genotípica das plantas como capaz de definir as suas estratégias de captação (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1992).

Desta forma, é possível classificar as plantas em três grandes grupos (GRENGER, 1999) (Figura 7), considerando a sua capacidade para absorção de elementos presentes no ambiente em que habita:

- i. Excludentes – captam pequenas quantidades de elementos, mesmo em condições de alta biodisponibilidade;
- ii. Acumuladoras – captam grandes quantidades de elementos mesmo em condições com baixa biodisponibilidade; e

- iii. Hiperacumuladoras - são espécies de plantas que podem captar grandes quantidades de elementos até mesmo na parte aérea, como, por exemplo, nas folhas.

Figura 7: Classificação das plantas de acordo com as diferentes estratégias de absorção e acúmulo de elementos presentes nos ambientes que as hospedam.



Fonte: GRENGER (1999).

Independentemente das estratégias de captação de elementos, existem fatores limitantes, barreiras naturais ou mecanismos de desintoxicação que permitem maior ou menor absorção e acumulação de elementos nos tecidos vegetais, tais como: a área de contato na raiz e folhas e o aumento da biomassa da planta (BAKER, 1981; ICHIHASHI, 1990; GRENGER, 1999).

Atualmente, muitos estudos levantaram questões importantes sobre as interações do sistema solo-planta com a captação de metais e outros metalóides (Ex: As e Hg), cujos efeitos tóxicos podem afetar todos os organismos vivos que têm nas plantas sua base trófica (TENG, 2004; NATARAJAN, 2006). Preocupações sobre os impactos na saúde pública e no ambiente natural foram levantadas também em relação a toda a gama de atividades operacionais relacionadas à mineração de urânio e ao resto do ciclo do combustível nuclear (incluindo acidentes nucleares), testes nucleares e urânio empobrecido de munições militares.

No entanto, os impactos ambientais de tais atividades, bem como seu perfil ecotoxicológico ainda são pouco estudados.

3.2 O FATOR DE TRANSFERÊNCIA SOLO-PLANTA ($FT_{s,p}$)

A entrada de radionuclídeos no tecido vegetal pode ocorrer através da deposição e adsorção na superfície dos órgãos aéreos das plantas (no caso destes elementos estarem presentes no ar) ou por meio de processos de absorção fisiológica (ROCHEDO e WASSERMAN, 2003). Com poucas exceções, a absorção pelas raízes é o passo introdutório do fluxo de radionuclídeos na cadeia alimentar. Essa absorção é influenciada por fatores bióticos e abióticos, como:

- Características da espécie vegetal (características fisiológicas, estruturais e morfológicas do sistema radicular, exigência nutricional, estágio de desenvolvimento, outras);
- Características físicas e químicas do solo (pH, textura, profundidade, capacidade de troca catiônica);
- Fatores climáticos (precipitação e evapotranspiração); e
- Manejo agrícola empregado no cultivo (no caso de culturas).

Uma vez presentes na solução do solo, os radionuclídeos podem participar de diversas reações:

- Adsorvidos aos coloides;
- Disponíveis para a absorção pelas raízes;
- Migrar de modo descendente no perfil do solo;
- Perdidos por arraste superficial *run-off*.

Assim, a transferência de radionuclídeos do solo para plantas depende de um complexo conjunto de interações físicas e químicas do sistema solo-planta-água. Para radionuclídeos, é geralmente definido que a concentração destes em uma planta ou parte dela é linearmente relacionada com a sua concentração no solo, na zona das raízes (rizosfera).

O índice tradicionalmente utilizado na literatura e recomendado pela União Internacional de Radioecologistas (IUR) para estimar a capacidade do transporte de radionuclídeos presentes na solução do solo, bem como seu acúmulo por vegetais, é o fator de transferência ($FT_{s,p}$) (IUR, 1989).

Este é definido como sendo a razão entre a concentração do radionuclídeo investigado nas plantas e da concentração do mesmo radionuclídeo presente no solo (rizosfera), de acordo com a Equação 1 (IAEA, 2010):

$$FT_{s,p} = \frac{C_p [planta]}{C_s [solo]} \quad (Eq. 1)$$

Onde:

$C_p [planta]$ é a concentração da atividade na matéria vegetal em peso seco ($Bq\ kg^{-1}$) $C_s [solo]$ é a concentração da atividade no solo em peso seco ($Bq\ kg^{-1}$).

Observação:

- i. O peso seco é recomendado para reduzir a incerteza do fator, salvo em caso de análise de frutas (IAEA, 2010).
- ii. Quanto a coleta do solo, o ideal é assumir-se uma profundidade de 20 cm, exceto em caso de análise em gramíneas, cuja profundidade deve ser de 10 cm (IAEA, 2010).

Esta razão nada mais é que uma fração do radionuclídeo que foi absorvido por uma planta a partir de seu substrato, sob condições de equilíbrio (SHEPPARD *et al.*, 2005), assumindo-se que esta acumulação é diretamente proporcional à concentração do elemento no solo e que os valores do $FT_{s,p}$ são lineares.

No entanto, é discutido na literatura (EHLKEN e KIRCHNER, 2002; VASCONCELLOS *et al.*, 1987; PULHANI *et al.*, 2005; VANDENHOVE *et al.*, 2009; ISLAMOVIĆ *et al.*, 2012) que para o mesmo tipo de solo, para a mesma espécie vegetal e para um mesmo radionuclídeo, os valores de $FT_{s,p}$ variam, inclusive em ordem de magnitude. Este fato abre precedentes para questionamentos acerca da validade deste índice mesmo para uma aplicação primária, que é o uso de modelos que estimam as consequências radiológicas de liberações de rotina de substâncias radioativas ou de acidentes nucleares. Esta grande variabilidade indica que uma relação direta entre a concentração de um radionuclídeo no solo e na planta não existe, e a razão para a tal variabilidade do $FT_{s,p}$ é óbvia pois, como citado anteriormente, aos fatores que influenciam a absorção dos elementos pelas raízes somam-se um número de processos relacionados à química, biologia e física do solo, à heterogeneidade do solo, à hidrogeologia e à fisiologia vegetal, e às atividades humanas, como a agricultura

(HANLON, 1991). Como já mencionado acima, a concentração no solo não é o único parâmetro que influencia a absorção dos radionuclídeos pelas plantas.

Outro questionamento apontado na literatura é que aproximadamente mais da metade das pesquisas usando $FT_{s,p}$ para radionuclídeos no sistema solo-planta são realizadas em regiões de clima temperado, o que pode contribuir para o aumento das incertezas associadas à dose de radiação estimada nos indivíduos e/ou populações residentes em regiões de clima tropical (SANTOS *et al.*, 2002; IAEA, 2010). As áreas temperadas apresentam mecanismos e taxas de captação desses radionuclídeos pelas espécies vegetais e culturas diferentes das ocorrências em áreas tropicais (VANDENHOVE *et al.*, 2009). Nas áreas tropicais, tão logo os materiais orgânicos alcançam a superfície do solo, são decompostos, sendo mínimo o acúmulo de matéria orgânica no solo e rápida a reciclagem de nutrientes e de contaminantes na vegetação (IAEA, 2010).

O número de dados disponíveis usando $FT_{s,p}$ para radionuclídeos no sistema solo-planta em região tropical é ainda muito pequeno. Por isso é muito importante a realização de mais estudos que possam formar uma base de dados consistentes ao parâmetro de transferência determinado nestas regiões (LAURIA *et al.*, 1998). Os mecanismos que controlam o $FT_{s,p}$ nas regiões tropicais merecem atenção especial, pois estas áreas são grandes produtoras de alimentos para o mercado mundial (STAVEN *et al.*, 2003).

Os valores encontrados por Vasconcellos (1987), na avaliação da absorção de ^{226}Ra e ^{210}Pb , referem-se à região de Poços de Caldas, região de radioatividade natural elevada, onde os vegetais foram coletados em fazendas grandes produtoras da região que utilizavam insumos químicos para aumentar a produtividade. Os valores foram corrigidos para massa seca do vegetal (VASCONCELLOS 1987, VASCONCELLOS 1999).

Lauria e colaboradores (1994) estudaram a transferência de ^{137}Cs do solo para plantas em Goiânia. Outro valor obtido também por Lauria e colaboradores (1998) é proveniente de plantações de subsistência da região de Buena, que apresenta radioatividade natural elevada, com utilização de adubos orgânicos.

Os vegetais analisados por Wasserman e colaboradores (2002) foram cultivados em áreas tradicionalmente agrícolas do Rio de Janeiro, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás.

Mazzilli e colaboradores (2012) estudaram a acumulação de radionuclídeos por soja, milho e alface em área com aplicação de fosfogesso.

Abaixo, o Quadro 3 apresenta alguns resultados de estudos envolvendo o $FT_{s,p}$.

Quadro 3: Concentração de atividade ($Bq\ kg^{-1}$) em estudos com algumas espécies de culturas utilizando o índice de $FT_{s,p}$.

VEGETAL	RADIONUCLÍDEO	CONCENTRAÇÃO DE ATIVIDADE	FONTE
Cenoura	Cs-137	$7,1 \times 10^{-2}$	Lauria <i>et al.</i> , (1994)
Alface	Cs-137	68×10^{-2}	
Rabanete	Cs-137	$10,1 \times 10^{-2}$	
Cenoura	Ra-226	$8,3 \times 10^{-2}$	Lauria <i>et al.</i> , (1998)
Feijão	Pb-210	42×10^{-3}	Vasconcellos <i>et al.</i> , (1987)
Cenoura	Pb-210	26×10^{-3}	
Batata	Pb-210	8×10^{-3}	
Milho	Pb-210	12×10^{-3}	
Feijão	Ra-226	30×10^{-3}	
Cenoura	Ra-226	29×10^{-3}	
Batata	Ra-226	10×10^{-3}	
Milho	Ra-226	14×10^{-3}	
Feijão	Ra-226	$1,4 \times 10^{-2}$	Wasserman <i>et al.</i> , (2002)
Feijão	Ra-228	8×10^{-3}	
Alface	Th-232	$7,5 \times 10^{-3}$	Mazzilli <i>et al.</i> , (2012)
Milho	Th-232	$6,6 \times 10^{-3}$	
Soja	Th-232	$2,2 \times 10^{-3}$	
Milho	U-238	$3,1 \times 10^{-2}$	

Fonte: Organizado pelo Autor.

Diante do que foi exposto, o $FT_{s,p}$ é atualmente o parâmetro recomendado para estimar a transferência de radionuclídeos do solo para planta e essa transferência refletirá na possibilidade da transferência da radiotividade para o homem por meio da cadeia alimentar.

4 PROGRAMA DE MONITORAÇÃO AMBIENTAL DO CDTN (PMA/CDTN)

4.1 CONCEPÇÃO DO PROGRAMA DE MONITORAÇÃO AMBIENTAL

O CDTN é uma instalação nuclear localizada na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais (Figura 8). Desde 1985 (Edição DERL/PD-022/85), um Programa de Monitoração Ambiental vem sendo realizado na poligonal do instituto e áreas adjacentes (FERREIRA, 1985). Esse plano vem sendo desenvolvido e atualizado nos últimos 30 anos com objetivo de atender em particular às exigências dos órgãos normativos e fiscalizadores do meio ambiente (IBAMA) e nuclear (CNEN) a fim de manter a sua Licença de Operação (CNEN, 2017).

Figura 8: Visão noturna de parte das instalações do CDTN, Belo Horizonte, MG.



Fonte: http://www.cdtm.br/images/galeria_pagina_inicial/predio_28_noite.jpg.

4.1.1 Objetivos do PMA/CDTN

Segundo Peixoto e Pêgo (1997), o PMA/CDTN foi planejado e é, a partir de então, operado com os seguintes objetivos:

- Avaliar a tendência, a longo prazo, das concentrações de poluentes no ambiente, visando detectar eventuais falhas nos procedimentos de controle das liberações e a iniciar medidas corretivas;
- Demonstrar a conformidade dos procedimentos adotados com as regulamentações aplicáveis e exigências legais;

- Manter um registro contínuo dos efeitos da instalação sobre os níveis de radioatividade ambiental;
- Prestar informações/esclarecimentos ao público em geral.

4.1.2 As principais medições realizadas pelo PMA/CDTN

O programa de análises do Programa de Monitoração Ambiental do CDTN restringe-se à medida das concentrações dos radionuclídeos mais críticos, ou seja, aqueles que, provavelmente, contribuam com uma dose anual por ingestão, inalação ou por irradiação externa (CDTN, 2014).

Nas instalações do CDTN, há medida de radioatividade em amostras de efluentes líquidos, emissões atmosféricas e de solo e plantas, como se segue:

a) Efluentes líquidos

O controle da liberação dos efluentes líquidos radioativos e não radioativos gerados antes de sua descarga para o meio ambiente é realizado por meio de medidas da radioatividade e concentração antes de sua descarga, cujos resultados tem mostrado que os níveis de concentração de atividade estão dentro dos valores previstos.

Esse fato é explicado porque as atividades do CDTN, realizadas nos laboratórios, ocorrem não só em escala piloto como há uma política de procedimentos rígidos para liberação de efluentes líquidos nos mesmos – Norma CNEN NE 6.05 Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas (CNEN, 1985) que são seguidas.

O efluente líquido do CDTN é recebido e tratado pela COPASA-MG (Companhia de Saneamento de Minas Gerais) através de um programa de recebimento de efluentes não-domésticos (PRECEND), cujos critérios constam da Resolução Normativa 003 de 7 de outubro de 2010 da ARSAE-MG (Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais), em especial as disposições contidas nos artigos 157, 158 e 159, e da Norma Técnica T.187 – “Lançamentos de Efluentes não Domésticos no Sistema de Esgotamento Sanitário da COPASA MG”. A saída do esgotamento sanitário do CDTN fica localizada próxima à portaria principal do instituto. Há ainda uma caixa de contenção exclusiva para a UPPR (radiofármaco) e Radiobiologia. Nestes pontos são realizadas amostragens com frequência quinzenal para saída principal e semanal com descarte

realizado de acordo com os níveis de concentração de atividade encontrados para o ^{18}F , α -total e β -total na caixa de contenção (CDTN, 2014).

b) Emissões atmosféricas

Uma via potencial para liberação de efluentes radioativos na área do instituto, de menor intensidade que a anterior, é através das chaminés dos laboratórios em decorrência dos trabalhos de beneficiamento de minérios com a eventual fuga de poeira oriunda desses processos (via atmosférica).

Há também as emissões de efluentes gasosos provenientes da UPPR. As amostragens locais são realizadas por meio de equipamento específico de monitoração do ar – amostrador atmosférico do tipo *High-Vol* AGV (CDTN, 2014).

c) Solo e Plantas

É importante realçar que a monitoração da presença de radionuclídeos nos compartimentos abiótico (solo) e biótico (plantas) no CDTN é realizado nos mesmos pontos de amostragem dos aerossóis, uma vez ao ano (geralmente no mês de outubro).

A amostragem do solo consiste no seu arraste superficial, com auxílio de uma enxada, em três áreas dentro do mesmo ponto de coleta, constituindo-se numa amostra composta. As plantas (parte aérea) são coletadas aleatoriamente com as mãos a 20 cm acima do solo. A gramínea, uma espécie sazonal, é o principal exemplar coletado. Ambas as amostras são colocadas em sacos plásticos identificados e encaminhadas para preparo seguido de análises (CDTN, 2014).

4.1.3 Resultados das últimas medições realizadas pelo PMA/CDTN

O programa de análises do PMA/CDTN utiliza-se do monitoramento de Alfa e Beta Total como indicador da necessidade de se passar ao estágio de determinação dos radionuclídeos específicos, caso os teores ultrapassem seus limites determinados na legislação vigente. No entanto, é rotina do programa realizar as análises dos radionuclídeos específicos das séries do U e Th para todas as amostras ambientais, independentemente dos resultados obtidos para Alfa e Beta Total (CDTN, 2015).

Os limites de valores mínimos de dose (em nível de referência e nível operacional relevante) seguidos pelo PMA/CDTN estão estabelecidos na Norma CNEN-NN-3.01 – *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica* – que por sua vez se baseia nas recomendações da ICRP, Publicação Nº 60, e da IAEA, *Safety Series* Nº 115 (CDTN, 2015).

Segundo o Relatório de Avaliação dos Resultados Analíticos do PMA/CDTN (CDTN, 2015), em relação as matrizes de interesse direto neste estudo (solo e plantas), verificou-se que entre os anos de 2009 e 2018, os resultados das análises de radionuclídeos específicos (^{238}U e ^{232}Th) e os produtos de seus respectivos decaimentos se mostraram para a matriz solo, dentro dos níveis aceitáveis de concentração em todos os monitoramentos, demonstrando a não ocorrência de tendências ou periodicidade.

Em relação a matriz planta também se verificou que os resultados das análises de radionuclídeos específicos (^{238}U e ^{232}Th) e os produtos de seus respectivos decaimentos apresentam-se na mesma ordem de grandeza em todos os pontos de monitoramento ao longo de todos os períodos de amostragem, o que demonstra uma não contribuição das atividades desenvolvidas pelas instalações que compõem o CDTN (CDTN, 2015).

5.1.1 Histórico

A história da AAN teve início em 1936 quando os cientistas George De Hevesy e Hilde Levi verificaram que amostras contendo certos tipos de elementos terras raras (ETR) tornavam-se radioativas após exposição a uma fonte de nêutrons. A partir dessa observação perceberam o potencial de emprego dessa reação nuclear na amostra seguida de medição da radioatividade induzida para se identificar qualitativa e quantitativamente os elementos nela presentes (GLASCOCK, 2004).

Com o advento dos primeiros reatores nucleares, aplicando-se fluxo de nêutrons da ordem de $10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, a AAN ganhou reconhecimento da comunidade científica como uma técnica analítica de alta sensibilidade (DE SOETE *et al.*, 1972; LYON Jr., 1964).

O aparecimento dos detectores de NaI (cintilação) na década de 50 e o desenvolvimento dos detectores de Ge(Li) de alta resolução nos anos 60 reforçaram a confiança na aplicação da técnica com maior exatidão na determinação de elementos traços. Já nas décadas de 70 e 80, com a evolução dos detectores de germânio hiperpuro (HPGe), mais eficientes, associados a uma eletrônica e microcomputadores, a técnica passou a ocupar um lugar de destaque entre as técnicas de maior aplicação na química analítica (DE SOETE *et al.*, 1972; FRONTASYEVA, 2011).

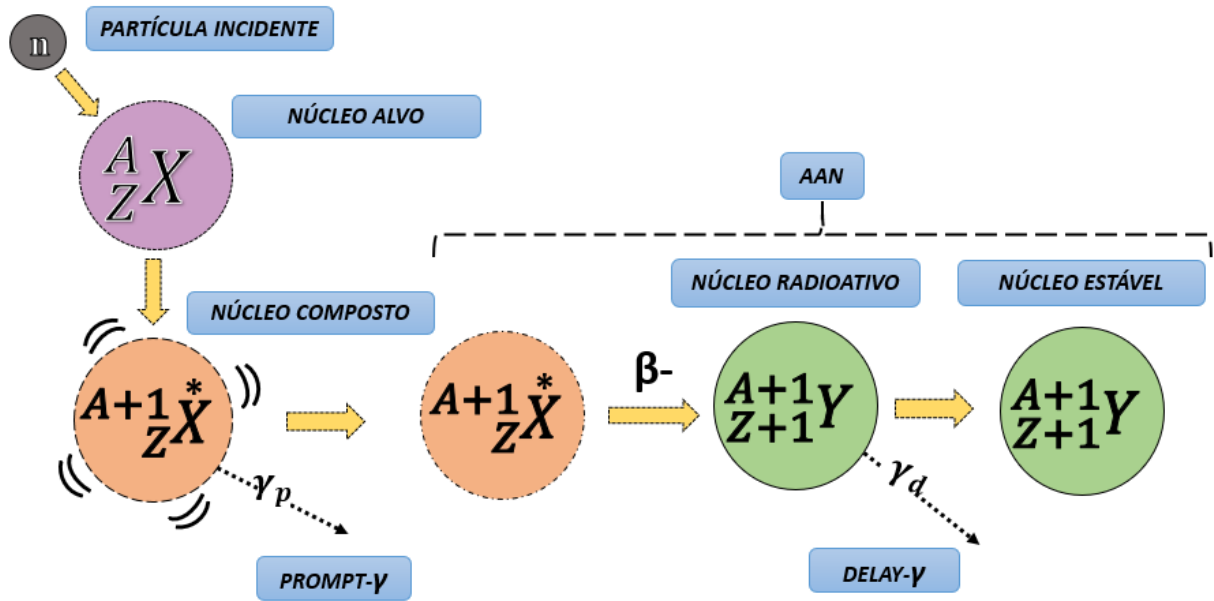
5.1.2 Princípio Físico

A AAN consiste, basicamente, na irradiação da amostra com um fluxo de nêutrons, posterior espectrometria gama dos radionuclídeos produzidos, análise (deconvolução) dos espectros gama obtidos e cálculos de concentração elementar (GLASCOCK, 2004).

Do ponto de vista da física, a técnica analítica (AAN) ocorre durante o tipo mais comum de reação para interação de nêutrons com a matéria, a captura radiotiva ou reação (n, γ) (Figura 11).

Esta reação possui maior probabilidade de ocorrência quando uma amostra, núcleo alvo (A_ZX), é bombardeada por um fluxo de nêutrons térmicos (1_0n), os quais irão interagir por meio de choque inelástico com a matéria. Assim, o núcleo alvo ora estável poderá se converter em um núcleo composto (${}^{A+1}_ZX^*$) e excitado. Esta reação é exotérmica e de importância decisiva para este tipo de análise (GLASSTONE e SESONSKE, 1994; LAMARSH e BARATTA, 2001).

Figura 11: Esquema ilustrado envolvendo a ocorrência da Ativação Neutrônica por decaimento.

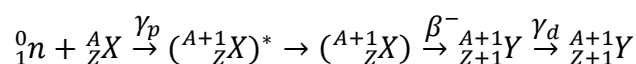


Fonte: Adaptado de GLASCOCK (2004) pelo Autor (2018).

A energia de excitação desse núcleo composto é proporcional à energia de ligação do nêutron com o núcleo. Quase que instantaneamente, da ordem de milissegundos (ms), esse núcleo perde parte de sua energia excedente na forma de radiação gama (γ_p), adquirindo uma configuração menos instável. A radiação gama pode ser medida durante a irradiação através de uma técnica chamada de “*prompt- γ* ” (PGNAA). Essa energia gama liberada será igual à energia cinética do nêutron que incidiu sobre o núcleo alvo (GLASCOCK, 2004).

Para a AAN, a parte de interesse da reação é quando esse núcleo (${}^{A+1}_ZX$), agora menos energético, mantém-se radioativo. Esse radionuclídeo irá então se ‘desexcitar’ (decair) emitindo partículas β^- juntamente com uma segunda radiação gama (γ_d). Esta energia pode ser medida pela técnica chamada “*delay- γ* ” (DGNA). No entanto, a uma taxa muito mais lenta, de acordo com a meia vida ($T_{1/2}$) específica de cada núcleo radioativo. Essa radiação pode ser usada tanto para identificar quanto para quantificar com precisão os elementos presentes numa amostra.

Dependendo da espécie radioativa, essa meia vida pode variar desde frações de segundo até vários anos, pois na busca pelo seu estado fundamental, o radionuclídeo formado sofrerá decaimentos mediante o seu tempo de meia vida até se tornar um isótopo estável e marcado ${}^{A+1}_{Z+1}Y$ do elemento original, como na reação abaixo (GLASCOCK, 2004).

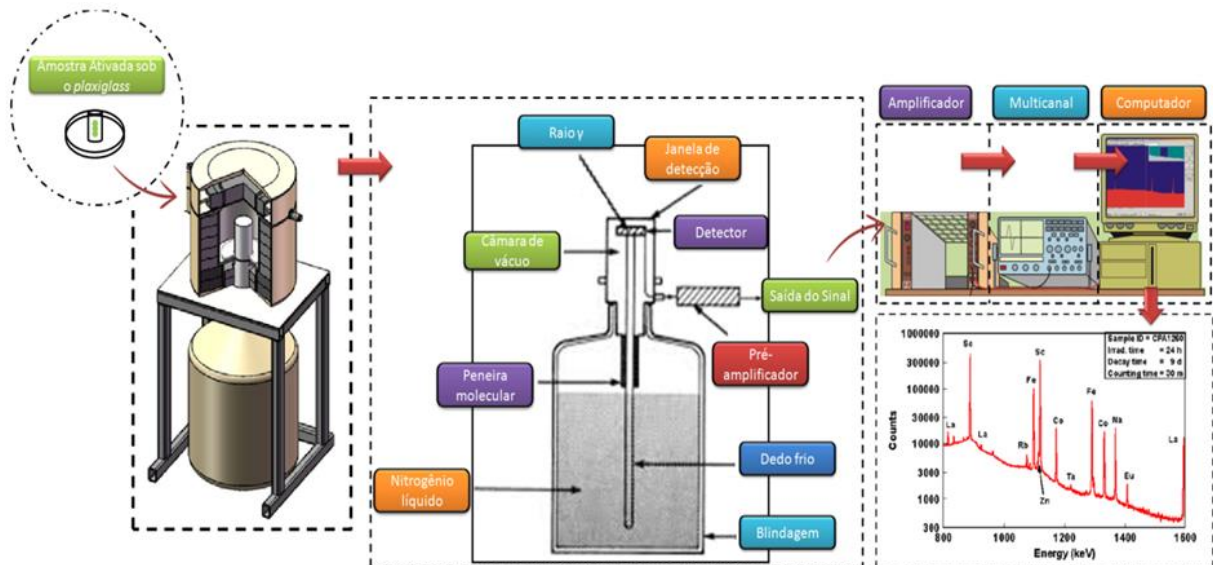


Através dessa reação é possível identificar tanto o radionuclídeo formado (núcleo filho) assim como o núcleo que o originou (núcleo pai).

5.2 ESPECTROMETRIA GAMA (γ)

Logo após a irradiação, as amostras com atividades consideradas adequadas para análise podem ser medidas instrumentalmente por um detector semicondutor de alta resolução, uma eletrônica específica associada (pré-amplificador e amplificador de alta voltagem) e analisadores multicanal ligados a microcomputadores com programas específicos para aquisição dos espectros das energias gama (γ) detectadas (Figura 12). A amostra irradiada é medida a uma distância (detector-amostra) na qual o seu tempo morto é menor que 10% (GLASCOCK, 2004; MENEZES e JACÍMOVIĆ, 2014).

Figura 12: Esquema de contagem das energias gama nas amostras utilizando Espectrometria Gama (γ).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2018).

Neste caso, as características qualitativas são: a energia de quanta gama emitido (E_γ) e a meia-vida do nuclídeo ($T_{1/2}$).

Atualmente, a forma mais eficiente de medir a energia gama (γ) emitida por um radionuclídeo é através do uso de detectores de Germânio hiper-puro (HPGe). O detector HPGe opera na temperatura do nitrogênio líquido (77 K) através de um compartimento contendo cristais de germânio formando um criostato a vácuo, que está termicamente ligado a um suporte de cobre, também chamado de “dedo frio” (GLASCOCK, 2004; MENEZES e JACÍMOVIĆ, 2014).

Duas características são extremamente importantes para se definir a qualidade de um detector HPGe: resolução e eficiência.

Uma alta resolução (em energia) na espectrometria gama amplifica o potencial da técnica (AAN), pois ela possui a capacidade de diferenciar picos de energia num campo espacial muito próximo de um mesmo espectro. Geralmente, a resolução do detector é caracterizada como *full width at half maximum* (FWHM) que representa a largura do fotopico à meia altura. Para muitas aplicações da AAN, um detector com resolução de 1,0 keV ou inferior em 122 keV (fotopico do ^{57}Co) e 1,8 keV ou inferior em 1332 keV (fotopico do ^{60}Co) é o suficiente (GLASCOCK, 2004; MENEZES e JACÍMOVIĆ, 2014).

Já a eficiência do detector depende da energia da radiação medida, do ângulo sólido entre a amostra e o cristal do detector e do volume ativo desse cristal. Um detector de grande volume terá uma alta eficiência. Para a AAN, um detector HPGe de 15-30 % de eficiência já é considerado adequado (GLASCOCK, 2004; MENEZES e JACÍMOVIĆ, 2014).

Outras características importantes a se observar em um detector são o formato do fotopico, a taxa de fotopicos de Espalhamento Compton, as dimensões e o formato do cristal.

5.3 ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA NO CDTN

No Laboratório de Ativação Neutrônica (LAN) da Unidade de Química Nuclear e Radioquímica do CDTN, a técnica de análise por ativação neutrônica é aplicada desde a primeira criticalidade do reator TRIGA MARK I IPR-R1, em 1960. Ao longo desses mais de 50 anos a técnica tem sido aplicada desde atividades de rotina do instituto, passando por convênios com instituições e universidades (nacionais e internacionais) até serviços solicitados por clientes diversos (MENEZES e SABINO, 1999).

Na década de 60, com o aumento da prospecção mineral no Brasil, a técnica foi aplicada no CDTN utilizando-se de nêutrons retardados (NR), para determinação de urânio. Já na década de 70 as análises passaram a ser realizadas pelo método instrumental (INAA – *Instrumental Neutron Activation Analysis*), com intuito de determinar outros elementos, começando pela análise do ^{232}Th através da medição do ^{233}Th (meia vida curta) e do ^{233}Pa (meia vida longa). Nesse período foram introduzidos também procedimentos de separação radioquímica com objetivo de reduzir interferentes na matriz de análise. Em meados da década de 90 as análises por ativação neutrônica no CDTN ganharam um novo capítulo com a introdução do método k_0 . Isso possibilitou o instituto realizar análise multielementar em uma única amostra (MENEZES

um monitor de fluxo de nêutrons. Este método mostrou-se mais confiável em comparação com o nível de precisão e incerteza do método de padronização relativa.

No entanto, o ano de 1974 é considerado o marco introdutório do conceito de “comparador único”. O método k_0 foi desenvolvido no *Institute for Nuclear Science of Rijksuniversiteit Gent*, em Gent, na Bélgica, por Simonits e Franz De Corte. A partir de então, surge uma alternativa aos métodos de análise por ativação neutrônica absoluto e comparativo.

O método se utiliza da convenção de Høgdal (HØGDAL *et al.*, 1962), a qual assume que a seção de choque (n, γ) varia com a lei $1/v$ na região térmica, isto é, até $\sim 1,5$ eV, para o qual o fator de Westcott é igual a 1 ($g=1$).

Esse método consiste em parametrizar os conjuntos de dados nucleares experimentais ou teóricos que aparecem na expressão do método absoluto, em uma única grandeza, que por sua vez pode ser determinada com relativa facilidade (SIMONITS e De CORTE, 1975).

Portanto, o método k_0 é uma combinação da simplicidade experimental do método absoluto, com a precisão do método relativo. Assim, com a utilização de um único monitor, a concentração do elemento pode ser determinada. Além disso, este método exclui as incertezas relacionadas ao uso de um padrão, mas, por outro lado, inclui as incertezas de k_0 , que são menores que as primeiras, não excedendo 3,5% (MENEZES e JAĆIMOVIC, 2014).

A análise por ativação neutrônica aplicando-se o método de padronização (k_0) se caracteriza pela irradiação simultânea de uma amostra e um monitor de fluxo de nêutrons, usualmente o ouro (Au), cuja vantagem é que tal comparador pode ter forma e característica de absorção de nêutrons e raios gama diferente. Assim, esse método apresenta uma ampla vantagem sobre os demais, pois elimina o uso de padrões multielementares por um único padrão correspondente, o fator k_0 (SIMONITS e De CORTE, 1975; De CORTE *et al.*, 1987).

Genericamente, o fator k_0 de um isótopo a ser analisado pode ser definido, com referência ao comparador de ouro, pela equação 2 (SIMONITS e De CORTE, 1975):

$$k_{0,Au}(a) = \frac{M_{Au} \theta_a \sigma_{0,a} \gamma_a}{M_a \theta_{Au} \sigma_{Au} \gamma_{Au}} \quad (Eq. 2)$$

Na qual:

- a é o índice correspondente ao analito;
- Au é o índice correspondente ao monitor utilizado (ouro);

- $k_{0,Au}(a)$ é o fator k_0 do nuclídeo analito relativamente ao nuclídeo monitor Au ;
- M é a massa molar ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$);
- θ é a abundância isotópica (fração de 1);
- γ é a intensidade gama absoluta (probabilidade de emissão gama) (fração de 1);
- σ_0 é a seção de choque a $2200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (nêutrons térmicos) (cm^2).

Embora os fatores k_0 sejam definidos em função das mesmas grandezas nucleares imprecisas do método absoluto, as incertezas individuais de tais grandezas são propagadas para o fator k_0 em si. Os fatores k_0 foram experimentalmente determinados para uma vasta gama de nuclídeos e podem ser encontrados na literatura (k_0 NUCLEAR DATA COMMITTEE, 2012). A fração mássica (ρ_a) de um analito ($\text{mg} / \text{kg}^{-1}$) em uma amostra analisada por meio do método k_0 -padronizado é dada por SIMONITS *et al.*, (1975) na Equação 3:

$$\rho_a = \frac{\left(\frac{N_p/t_m}{S \cdot D \cdot C \cdot w_s \cdot COI} \right)_a}{\left(\frac{N_p/t_m}{S \cdot D \cdot C \cdot w \cdot COI} \right)_{Au}} \cdot \frac{1}{k_{0,Au}(a)} \cdot \frac{G_{th,Au} \cdot f + G_{e,Au} \cdot Q_{0,Au}(\alpha) \frac{\varepsilon_{p,Au}}{\varepsilon_{p,a}}}{G_{th,a} \cdot f + G_{e,a} \cdot Q_{0,a}(\alpha) \frac{\varepsilon_{p,Au}}{\varepsilon_{p,a}}} \cdot 10^6 \quad (Eq. 3)$$

Na qual:

- a é o índice correspondente ao analito;
- Au é o índice correspondente ao monitor de fluxo de nêutrons utilizado;
- N_p é o número de contagens no fotopico de energia E_γ (já corrigida por DT);
- t_m é o tempo de medição no sistema de espectrometria gama (s);
- S é o fator de saturação durante a irradiação: $S = 1 - e^{-\lambda t_i}$, onde λ é a constante de decaimento e t_i é o tempo de irradiação da amostra;
- D é o fator de decaimento: $D = e^{-\lambda t_d}$, onde t_d é o tempo de decaimento, medido desde o fim da irradiação até o início da contagem na espectrometria gama;
- C é a correção devida ao decaimento do radionuclídeo durante a medição no sistema de espectrometria gama: $C = \frac{(1 - e^{-\lambda t_m})}{\lambda t_m}$;
- w_s é a massa da amostra (g);
- w_{Au} é a massa de ouro contida no monitor utilizado (g);
- COI é o fator de correção por fenômenos de coincidência;
- $k_{0,Au}(a)$ é o fator k_0 do analito a relativo ao monitor Au ;
- G_{th} é a correção pela autoblindagem de nêutrons térmicos;

- G_e é a correção pela autoblindagem de nêutrons epitérmicos;
- f é a razão entre os fluxos de nêutrons térmicos e nêutrons epitérmicos, $f = \frac{\varphi_{th}}{\varphi_e}$;
- ε_p é a eficiência do sistema de detecção gama para o fotopico de energia E_γ (fração de 1);
- $Q_0(\alpha) = (Q_0 - 0,429) \cdot \bar{E}_r^{-\alpha} + \frac{0,429}{(0,55)^\alpha \cdot (2\alpha+1)}$, onde:
 - i. α é a grandeza que mede o desvio da distribuição de nêutrons epitérmicos $1/E_n$, aproximada por $1/(E_n)^{1+\alpha}$;
 - ii. Q_0 é a razão da integral de ressonância I_0 e a seção de choque $\sigma_0(n,\gamma)$ a 2200 m s⁻¹ = I_0/σ_0 ;
 - iii. \bar{E}_r é a integral de ressonância efetiva;
- 10^6 é o fator de conversão de unidades $mg\ kg^{-1}$.

Jaćimović e colaboradores (2003) relatam que a técnica (k_0 -INAA) apresenta três pilares fundamentais:

- i. Caracterização da taxa de fluxo de nêutrons do reator. Como o f (razão entre os fluxos térmico e epitérmico) e o α (parâmetro que indica o afastamento do fluxo de nêutrons epitérmicos do comportamento ideal (I/E));
- ii. Sistema de contagem gama absolutamente calibrado. Como os detectores de HPGe conectados a uma eletrônica e programas computacionais para aquisição de espectros gama; e
- iii. Uma única constante nuclear (k_0) para cada radionuclídeo calculado.

Acharya e colaboradores (2012) descrevem ainda a importância da eficiência absoluta na detecção dos picos de energia (ε) e dos dados nucleares (Q_0 , \bar{E}_r , etc.) do elemento padrão, do comparador e do fluxo do monitor. Destacam que as determinações de parâmetros dos fluxos de nêutrons e da eficiência do sistema de detecção são importantes para calibração das posições de irradiação na mesa giratória do reator e dos detectores, respectivamente.

Quanto aos valores das amostras pelo método k_0 , estes são determinados com 2% ou menos de incerteza para 91 isótopos e com incerteza de até 5% para outros 21 isótopos (DE CORTE, 1987).

Vale ressaltar também que dentre as muitas vantagens na aplicação do método k_0 estão: menor custo operacional; determinação multielementar nas amostras; e detecção de elementos não previstos, o que não ocorre no método convencional (MENEZES e JACÍMOVIĆ, 2014).

Apesar das inúmeras vantagens, em se tratando de química analítica, da técnica AAN em relação a outras técnicas, sua principal limitação reside na obtenção da sua estrutura básica de trabalho que necessita de um reator nuclear e conseqüentemente de todo aparato de segurança que esse tipo de fonte exige, tais como mão de obra treinada para operar o reator, assim como as boas práticas da proteção radiológica para lidar com segurança em relação a exposição à radiação ionizante. Há também a preocupação com o manuseio seguro do material radioativo e protocolos para estocagem e/ou descarte de resíduos das atividades. Além disso, a técnica requer um tempo maior para as análises, principalmente no tocante aos radionuclídeos com meias-vidas médias para longas (até 6 semanas) (KUBEŠOVÁ, 2012).

5.5 REATOR TRIGA MARK I IPR-R1

Reatores nucleares de baixa potência são classificados como reatores com propósitos de pesquisa. O reator TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomics*) MARK I IPR-R1, foi fabricado pela *General Atomics Company*, empresa americana especializada em defesa e tecnologia nuclear.

O reator TRIGA é um reator, cujas características são específicas para aplicação em pesquisas em neutrônica, termo-hidráulica, instrumentação e controle, treinamento de pessoal especializado, produção de radioisótopos usados em pesquisa, dentre outras aplicações na indústria, agricultura, mineração e meio ambiente, por exemplo. (PINTO *et al.*, 2010; MENEZES e JACÍMOVIĆ, 2006). O núcleo já está preparado para operar em 250 kW, porém está licenciado a operar em 100 kW.

Adquirido pelo governo de Minas Gerais através do programa norte americano “Átomos para Paz”, o reator está localizado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), no *Campus* da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em Belo Horizonte. A primeira criticalidade do reator TRIGA MARK I IPR-R1 foi alcançada em 1960.

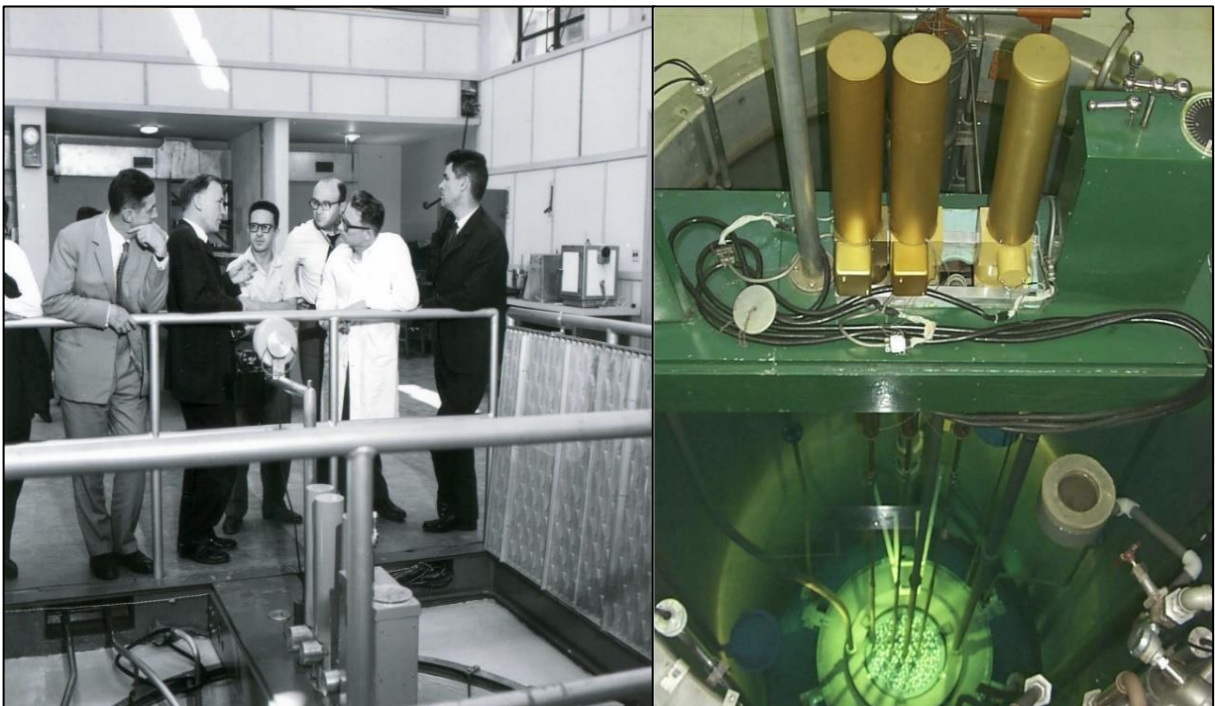
O TRIGA (Figura 14) foi concebido num conceito de piscina de água leve desmineralizada com 6,625 m de profundidade, 1,92 m de diâmetro e arrefecido por convecção natural (REIS *et al.*, 2010). Seu combustível (sólido) é composto por uma liga metálica de urânio e hidreto de zircônio, esse último agindo como moderador, (U-ZrH). Contém de 8,5 %

de urânio enriquecido (^{235}U) a 20% (PINTO *et al.*, 2010; REIS *et al.*, 2010; SOUZA e MESQUITA, 2011). Em operação por quase 60 anos, esse reator pode operar por muitos anos ainda, uma vez que apenas ~ 4% do seu combustível foi queimado até o momento.

O núcleo do reator TRIGA MARK I IPR-R1 tem a forma de um reticulado cilíndrico composto por 6 anéis (A, B, C, D, E, F). Nele se encontram 91 posições preenchidas por 63 elementos combustível-moderador (elementos de grafite). Destes, 59 são elementos originais, revestidos com alumínio e 4 elementos inseridos a partir de 2001-2002 com revestimento de aço inoxidável; além disso, estão também inseridas neste núcleo as 3 barras de controle (apresentadas mais abaixo) e outros componentes. O entorno desse núcleo é revestido por um anel (refletor) de grafite (PINTO *et al.*, 2010; REIS *et al.*, 2010; SOUZA e MESQUITA, 2011).

O acionamento, controle de potência e desligamento do reator TRIGA é realizado a partir de uma mesa de comando que realiza os movimentos axiais das 03 barras de controle no núcleo do reator. Este conjunto de barras fica posicionado no interior de tubos-guia perfurados, afixados a uma grade na base do núcleo (PINTO *et al.*, 2010).

Figura 14: Imagens de arquivo do Reator TRIGA MARK I IPR-R1®.



Fonte: Memória CDTN – <http://www.repositorio.cdn.br:8080/jspui/handle/123456789/300>.

Nota: À esquerda, fotografia da inauguração do reator TRIGA na década de 50. À direita, fotografia do núcleo do reator TRIGA nos anos 2000.

As barras de controle são feitas de carboneto de boro. As duas mais próximas do centro (núcleo do reator) são as barras de controle e de segurança respectivamente. A primeira,

controle grosso, tem a função de compensar as grandes variações de reatividade do reator (envenenamento) e a segunda é usada apenas em condições de real emergência (desligamento do reator). Ao longo do período em que o reator fica em operação, essa barra permanece totalmente extraída do núcleo. A terceira barra, situada a uma distância mais afastada em relação ao núcleo do reator é a barra de regulação, controle fino, que tem a função de compensar pequenas variações de reatividade (temperatura) (PINTO *et al.*, 2010). O controle das barras ocorre sob a ação de eletroímãs acoplados ao sistema, através dos quais as barras podem ser movimentadas para cima ou para baixo, aumentando ou diminuindo a reatividade. Em caso de acidente, a energia é cortada (corte eletromagnético) e tais barras caem no núcleo do reator provocando o desligamento automático do reator (segurança passiva).

Os principais terminais de irradiação do reator TRIGA MARK I IPR-R1 são: Tubo Central, Terminal Pneumático para Análise por Nêutrons Retardados de Fissão e Mesa Giratória. A mesa giratória do reator é formada por 40 posições de irradiação.

6 ÁREA DE ESTUDO

6.1 APRESENTAÇÃO DO CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR – CDTN

O CDTN tem sua origem na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em 1952 (Figura 15), com a denominação de Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR). Suas atividades iniciais incluíam a pesquisa de ocorrências minerais radioativas e estudos no campo da física nuclear, da metalurgia e de materiais de interesse nuclear. Em 1965, por meio de convênio entre a UFMG e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), o IPR foi integrado ao Plano Nacional de Energia Nuclear. Transferido em 1972 para a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear (CBTN), agregou aos seus objetivos iniciais o desenvolvimento da tecnologia nuclear.

Figura 15: Foto do prédio GT (Grupo do Tório) quando ainda era IPR (Inst. de Pesquisas Radioativas) e vinculado à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1952.



Fonte: Memória CDTN – <http://www.repositorio.cdtm.br:8080/jspui/handle/123456789/142>.

Com a extinção da CBTN, em 1974, foi incorporado pelas Empresas Nucleares Brasileiras S/A (NUCLEBRAS) e passou a atuar no atendimento direto das necessidades de desenvolvimento tecnológico das unidades industriais dessa empresa. Destacou-se no apoio ao licenciamento das instalações nucleares, no beneficiamento do minério de urânio, na fabricação

de elementos combustíveis e no treinamento dos operadores de reatores da usina nuclear de Angra 1 (CDTN, 2006).

Desde os anos 90 (Figura 16) o CDTN está subordinado à Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que tem sede e foro na cidade do Rio de Janeiro e é vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC).

Figura 16: Foto do acesso principal às instalações do CDTN (2002-2018), representando a era CNEN, iniciada na década de 1990.



Fonte: (Esq.) <http://www.repositorio.cdtm.br:8080/jspui/handle/123456789/386>; (Dir.) Foto de A. P. Santiago.

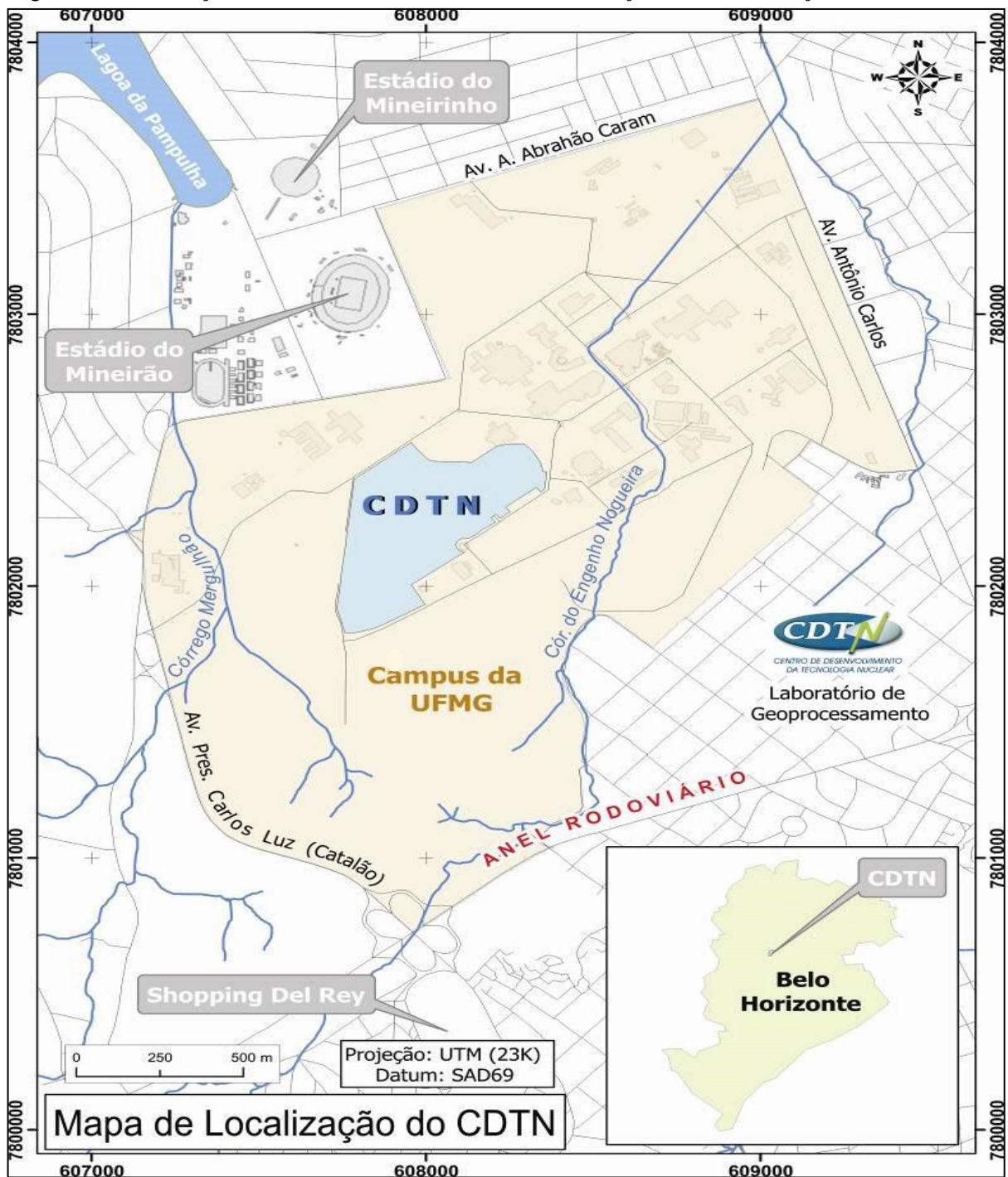
Atualmente, o instituto tem demanda crescente nas áreas de elemento combustível nuclear, tratamento de rejeitos, estudos do meio ambiente, tecnologia mineral, nanotecnologia, aplicações médicas, produção do radiofármaco ^{18}F (CDTN, 2014).

Para manter-se em operação, o instituto precisa atender às exigências da legislação vigente para tais atividades. Assim, o CDTN mantém, desde 1985, um Programa de Monitoração Ambiental (PMA), de forma a garantir a segurança radiológica e ambiental dentro e no entorno imediato de sua área (FERREIRA, 1985).

6.2 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DO CDTN

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (Figura 17) está situado a $19^{\circ} 52'$ S e $43^{\circ} 58'$ O, ocupando uma área de 240.900 m^2 , desta, 30.000 m^2 é de área construída (CDTN, 2006).

Figura 17: Localização do CDTN em Belo Horizonte e em relação a sua vizinhança.



Fonte: Núcleo de Pesquisa em Geotecnologias e Modelagem Ambiental SEAMA/CDTN.

A área tem por característica climática temperaturas médias que variam entre 16 e 24 °C, tipicamente mesotérmico úmido (ASSIS, 2001; INMET, 2007); a umidade média relativa variando entre 60 e 85 % destaca duas estações bem definidas, uma seca e fria (de abril a setembro) e outra chuvosa e quente (de outubro a março) (ASSIS, 2001; INMET, 2007); a precipitação pluviométrica média anual está entre 1.200 a 1.500 mm, onde os meses mais chuvosos vão de novembro a janeiro e os menos chuvosos estão entre junho e agosto (ASSIS,

2001; INMET, 2007); a insolação da área apresenta maiores valores nos períodos de junho, julho e agosto e os menores valores entre dezembro e março (INMET, 2007).

A área não construída e não urbanizada da instalação é constituída por uma cobertura vegetal natural com duas características fitofisionômicas típicas da região: matas semidecíduas e cerrado (KAMINO, 2002; NEVES, 2002). Apresenta uma cobertura vegetal natural, caracterizada por arbustos de pequeno porte, possuindo em alguns pontos um aspecto fisionômico um pouco mais denso, onde as condições de umidade ou a maior fertilidade dos solos (intrusões metabasíticas) permitem uma maior proliferação vegetal (CDTN, 2014).

Apesar de ser muito menor que outras áreas verdes próximas ou mesmo se comparada a algumas unidades de conservação com reconhecimento científico e popular, é inegável a sua importância na composição de áreas naturais próximas, criando pontos de pouso para aves migratórias, ajudando na manutenção de processos naturais que compõe o ambiente local, como o clima e a estabilidade de processos pedológicos (OLIVEIRA *et al.*, 1992; MODNA e VECCHIA, 2003; VALADÃO *et al.*, 2006; COSTA e FERREIRA, 2007).

A instalação possui, limitando a sua poligonal, cercas isolando sua área das outras áreas pertencentes à Universidade Federal de Minas Gerais. No entanto, essas cercas permitem a passagem e a dispersão de animais e plantas, com exceção de grandes mamíferos (capivaras e pacas). Em determinados trechos, há a formação de corredores arborícolas entre diferentes áreas verdes (como a Estação Ecológica da UFMG) que apesar de apresentar trechos de aceiros bem definidos, possuem proximidade suficiente para o trânsito e dispersão de organismos da flora e da fauna local (CDTN, 2014).

7 METODOLOGIA DO TRABALHO

7.1 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE TRABALHO

O trabalho experimental teve a sua metodologia desenvolvida em três etapas:

ETAPA 1 – Verificação da metodologia de análise da radioatividade natural, no meio ambiente, desenvolvida pelo PMA/CDTN.

ETAPA 2 – Verificação da capacidade de absorção, translocação e acumulação de Th e U pelas plantas utilizadas na metodologia de análise da radiação natural pelo PMA/CDTN em ambiente controlado.

ETAPA 3 – Avaliação de espécie biomonitora com capacidade de absorver, translocar e acumular Th e U como complemento a metodologia de análise da radiação natural do PMA/CDTN.

7.2 ETAPA 1 – VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DA RADIAÇÃO NATURAL NO MEIO AMBIENTE, DESENVOLVIDA PELO PMA/CDTN

Para o atendimento às condicionantes regulatórias exigidas pela segurança ambiental (IBAMA) e nuclear (CNEN), verificou-se, nesta etapa, os processos metodológicos de coleta e preparo das amostras ambientais (solo e plantas) para análise da radioatividade natural pelo PMA/CDTN.

Inicialmente é descrita a metodologia como está aplicada no PMA/CDTN. Em seguida, é apresentada a metodologia, desenvolvida neste estudo, para verificação dela.

Portanto, o objetivo desta etapa é verificar a metodologia de análise da radiação natural desenvolvida pelo PMA/CDTN correlacionando fatores influentes nos processos de coleta como, por exemplo, sazonalidade, fração do solo, utilização da planta completa (raiz e parte aérea) e o refinamento de procedimentos importantes no preparo das amostras ambientais submetidas a análises cada vez mais sensíveis.

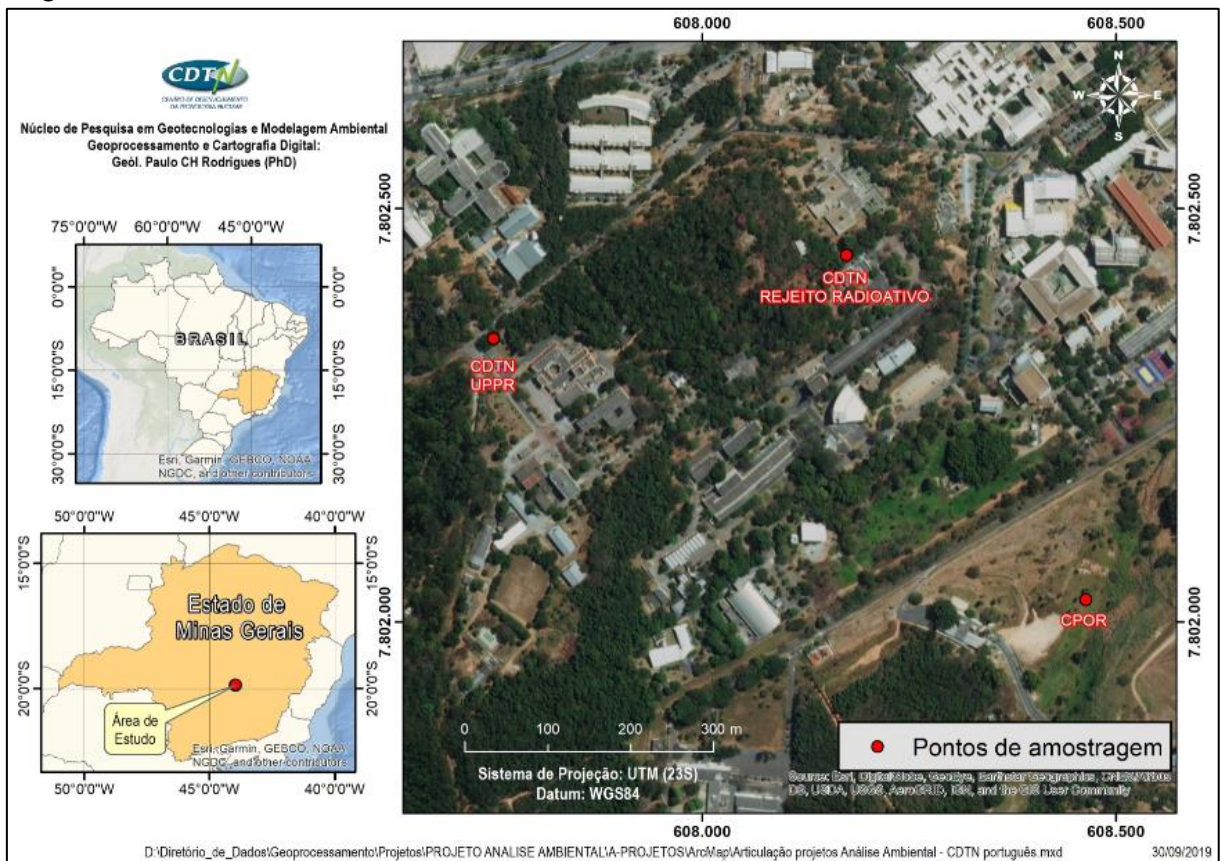
7.2.1 Métodos de coleta e preparo das amostras ambientais realizados pelo PMA/CDTN

Atualmente, a coleta de amostras ambientais (solo e plantas) do PMA/CDTN é realizada de forma simultânea, 1 vez ao ano, geralmente no mês de outubro (período quente e chuvoso). Toda metodologia apresentada neste item está fundamentada no Relatório do Programa de Monitoração Ambiental do CDTN (CDTN, 2015).

Pontos de Coleta no PMA/CDTN

O programa de monitoração ambiental (PMA) do CDTN define para sua avaliação dos níveis de radioatividade natural em matrizes ambientais (solo e plantas), três pontos de coleta, os mesmos pontos determinados para amostragem de aerossóis e trítio no vapor d'água (CDTN, 2015). Estes pontos estão caracterizados, no campo, pela presença de um amostrador atmosférico do tipo *Hi-Vol* – AGV. A figura 18 apresenta um recorte da área do CDTN e seu entorno, composto em parte pelo *Campus* da UFMG e da área do Centro de Formação de Oficiais da Reserva – CPOR, pertencente ao Colégio Militar de Belo Horizonte.

Figura 18: Pontos de coleta das amostras ambientais do PMA/CDTN – Solo, plantas, aerossóis e vapor d'água.



Fonte: Núcleo de Pesquisa em Geotecnologias e Modelagem Ambiental SEAMA/CDTN.

Os três pontos de coleta das matrizes solo e plantas – Pontos CDTN-1 e CDTN-2 dentro do poligonal do instituto e o Ponto CPOR na área do Colégio Militar de Belo Horizonte, área adjacente ao instituto – são assim descritos:

- Ponto CPOR – considerado o “branco” da amostragem, localizado fora do perímetro do instituto (montante), a aproximadamente 1,6 km da área do CDTN.
- Ponto CDTN-1 – localizado dentro da área do instituto, na saída oeste, estrategicamente posicionado ao lado da UPPR (jusante).
- Ponto CDTN-2 – localizado dentro da área do instituto, na porção noroeste, estrategicamente posicionado ao lado do Galpão de Rejeitos de baixa atividade (jusante).

Os pontos localizados dentro dos limites da área do CDTN (CDTN-1 e CDTN-2) tiveram sua escolha determinada, tecnicamente, em função de estarem na rota de maior frequência dos ventos, medida pela Estação Meteorológica do CDTN, na direção sudeste a uma velocidade entre 0,5 e 5,7 m/s (MOURA, 2015).

Conseqüentemente, o ponto considerado o “branco” da amostra (CPOR) foi assim determinado por estar na rota de menor frequência dos ventos.

Plantas coletadas no PMA/CDTN

As espécies utilizadas para análise da radioatividade natural pelo PMA/CDTN fazem parte da cobertura vegetal da sua área (item 6.2) e da área do CPOR.

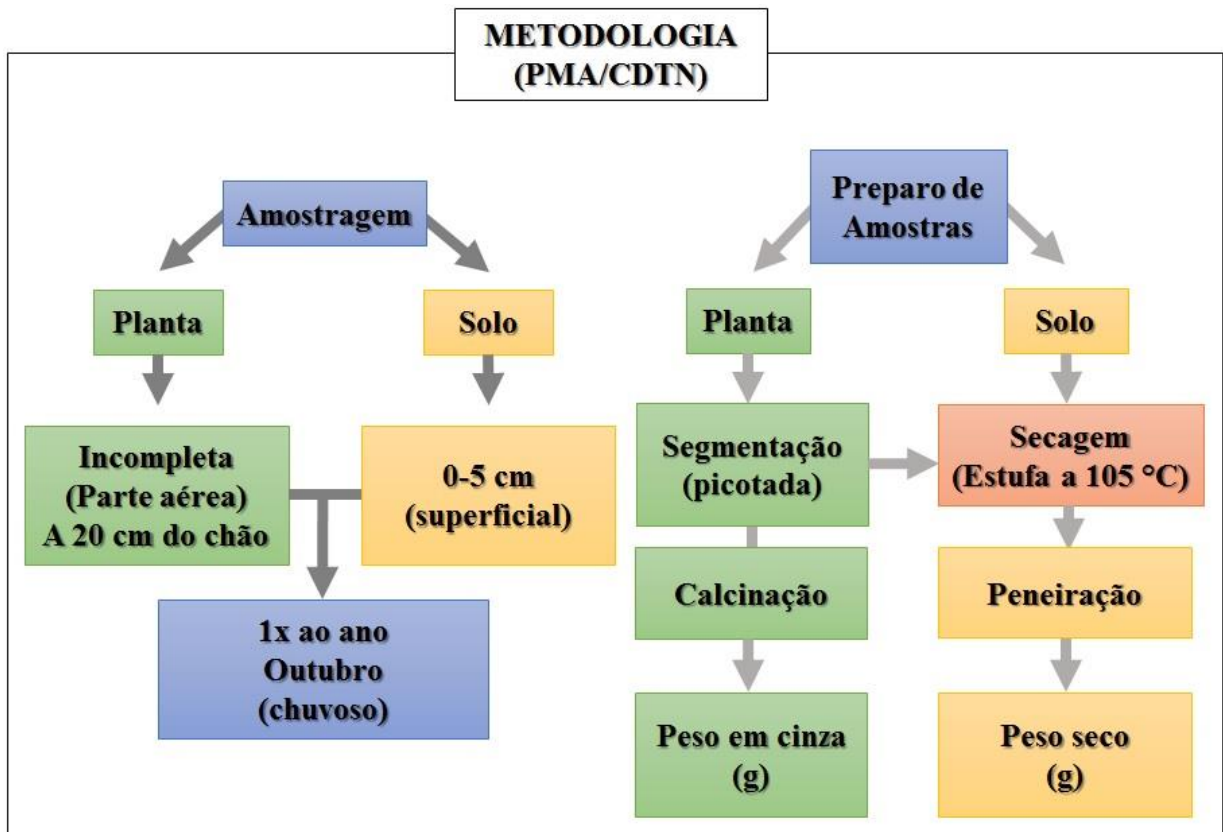
As espécies foram escolhidas pela sua disponibilidade nos pontos de coleta. As espécies estão distribuídas nos pontos de coleta da seguinte forma:

- a) Braquiária brizanta, *Urochloa brizantha*, presente no ponto CPOR.
- b) Grama bermuda, *Cynodon dactylon*, presente no ponto CDTN-1 e CDTN-2, respectivamente.

A identificação das espécies foi realizada por meio de literatura específica e consulta a especialistas do herbário do Instituto de Ciências Biológicas (ICB) da UFMG. As espécies estão classificadas de acordo com a *Angiosperm Phylogeny Group* – APG II (2003) em gênero e espécie.

A Figura 19 resume ambas as etapas de coleta e preparo das amostras ambientais como estas são realizadas através da metodologia de trabalho do PMA/CDTN.

Figura 19: Etapas de coleta e preparo de amostras ambientais (planta e solo) executadas na metodologia de trabalho do PMA/CDTN.



Fonte: Esquema elaborado pelo Autor (2018).

7.2.1.1 Coleta das amostras de solo e plantas – Metodologia do PMA/CDTN

Solo

O método de coleta do solo no PMA/CDTN é realizado apenas na sua fração superficial – até 5 cm de profundidade – utilizando-se de ferramenta de arraste, enxada.

Plantas

O método de coleta das plantas, normalmente as de maior incidência no local, é realizado de forma manual com auxílio de uma ferramenta de corte a 20 cm do solo.

As plantas são obtidas de forma incompleta, uma vez que o método de roçar a vegetação permite a obtenção apenas da parte aérea das plantas, excluindo-se por completo a parte radicular delas.

7.2.1.2 Preparo das amostras de solo e plantas – Metodologia do PMA/CDTN

Solo

Usualmente, o método de preparo das amostras de solo do PMA/CDTN é realizado utilizando-se de estufa para secagem do mesmo a uma temperatura de 120 °C e depois de secas, as amostras são peneiradas em malha de 250 *mesh* a uma granulometria mais homogênea e acondicionadas em frascos de polietileno com tampa e encaminhadas para análise (CDTN, 2015).

Plantas

O método de preparo da parte aérea das amostras de plantas é realizado a partir da trituração da biomassa vegetal que foi seca em estufa sem qualquer etapa prévia de limpeza delas. Para finalizar, as plantas ainda passam por uma etapa de calcinação, cujas cinzas são acondicionadas em frascos de polietileno e levadas para análise (CDTN, 2015).

7.2.2 Métodos de coleta e preparo de amostras ambientais aplicados na verificação dos procedimentos do PMA/CDTN

Neste estudo foi proposto a realização de coleta das matrizes ambientais (solo e plantas) em dois períodos de sazonalidade distintos nos mesmos pontos definidos para realização da coleta do PMA/CDTN.

As duas campanhas de amostragens foram assim definidas:

- Campanha 1 – realizada, como usual do PMA/CDTN, em período chuvoso e quente (outubro de 2017).
- Campanha 2 – realizada em período seco e frio (maio de 2018).

O objetivo da realização de duas campanhas anuais é confrontar os dados obtidos nos dois períodos distintos de amostragens e verificar a influência da sazonalidade sobre fatores importantes para a biodisponibilidade dos elementos no solo e a capacidade de absorção destes pelas espécies vegetais estudadas.

7.2.2.1 Coleta das amostras de solo e plantas – Metodologia de verificação do PMA/CDTN

Solo

Para amostragem do solo, foi proposto aplicar uma certa variação na obtenção de uma fração mais representativa do material em profundidade (Figura 20).

Figura 20: Procedimento de coleta do solo em profundidade utilizando amostrador do tipo *Liner*.



A) Inserção do amostrador; B) Retirada da amostra; C) *Liners* contendo amostras de solo.
Fonte: Autor (2018).

A amostragem de solo em profundidade nos permite obter resultados temporais (histórico), uma vez que a superfície do solo está sujeita a constante alteração em função da deposição de matéria orgânica e lixiviação pelas águas. Além disso, a amostragem em profundidade poderá nos mostrar qual é a fração de solo (superior ou inferior) mais adequada para nos indicar a presença dos radionuclídeos de interesse.

A profundidade de 30 cm foi definida com objetivo de estabelecer uma faixa mais ampla que permitisse a visualização da fração com melhores resultados. Esta profundidade corresponde ao ambiente radicular (rizosfera) da maior parte das plantas de pequeno e médio porte. O solo em profundidade foi dividido em:

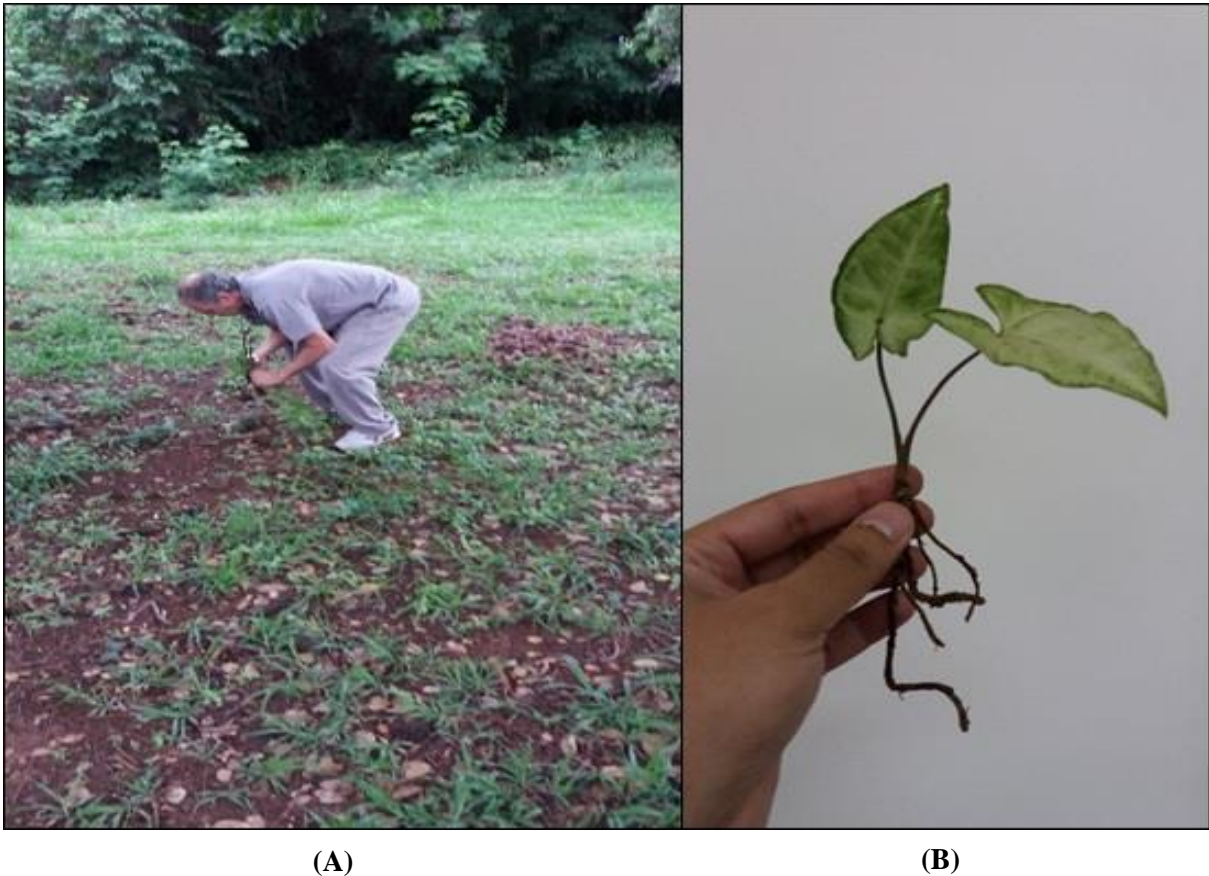
- a) Fração Superior – uma faixa de 0 a 15 cm de profundidade
- b) Fração Inferior – uma faixa de 15 a 30 cm de profundidade

Todas as amostras foram obtidas em triplicata com o auxílio de um amostrador de tubo metálico (bate-estaca manual) que utiliza em seu interior '*liners*' ou canudos plásticos de 30 cm de comprimento cuja função é o confinamento da amostra de solo. Este procedimento permite uma amostragem mais fidedigna do solo, pois não há revolvimento do mesmo e, portanto, não ocorre a mistura entre as diferentes frações dele. O '*liner*', por ser plástico, permite ainda a segmentação da amostra dentro da faixa de profundidade escolhida.

Plantas

Para coleta das plantas foi proposto o método de amostragem manual, sem o uso de ferramenta cortante, cujo objetivo é a obtenção da amostra da planta completa – parte aérea (caule e folhas) e raiz – e no seu estágio de maior crescimento vegetativo possível (Figura 21).

Figura 21: Procedimento de coleta da planta manualmente inteira – raiz e parte aérea (caule e folhas).



Nota: A) Coleta manual das espécies; B) Amostra completa – raiz e parte aérea (caule e folhas).
Fonte: Autor (2018).

Em cada ponto de coleta procurou-se coletar um número igual e representativo das espécies (10 amostras). No entanto, observou-se que as duas espécies não estavam distribuídas de forma igual nos pontos de coleta, como se segue:

- Ponto CPOR – Apenas a espécie *Urochloa brizantha*.
- Ponto CDTN-1 e Ponto CDTN-2 – Apenas a espécie *Cynodon dactylon*.

Nesse caso, percebe-se que entre os pontos de coleta, somente os pontos dentro da área do CDTN apresentam as mesmas espécies.

7.2.2.2 Preparo das amostras de solo e plantas – Metodologia de verificação do PMA/CDTN

Solo

Neste estudo, as amostras de solo foram abertas sobre papel toalha em bandejas de aço inoxidável e deixadas para secar naturalmente por 48 horas. Neste intervalo, uma fração dessa amostra úmida foi pesada em balança de precisão (peso úmido).

Ao final de dois dias, as amostras de solo foram levadas ao forno durante 6 horas a uma temperatura de 120 °C para finalizar sua secagem. A utilização do forno para secagem do solo garante a remoção completa de toda água presente na amostra. No quarto dia, após a coleta, o solo completamente seco foi peneirado em malha de 250 *mesh* e uma composição ideal da amostra (homogênea) foi obtida a partir do quarteamento do material (Figura 22).

Figura 22: Procedimentos de preparo do solo para análises física e química.



B (superior); C (inferior)

A

D (superior); E (inferior)

Nota: A) Solo completamente seco após 96 horas; B) Peneira de 250 *mesh*; C) Solo peneirado (granulometria fina); D) Homogeneização da amostra (quarteamento); E) Alíquota de amostra do solo acondicionada e pronta para análises. Fonte: Autor (2018).

Em seguida, as amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno (descontaminados) com tampa de rosca identificadas e tiveram as massas aferidas novamente em balança de precisão (peso seco).

Plantas

As plantas, coletadas inteiras, passaram por uma etapa prévia de lavagem. As espécies foram deixadas com as raízes de molho em bandejas plásticas com água deionizada, por 24 horas, para facilitar a retirada do solo aderido.

Em seguida, foram lavadas, de forma intercalada, em água corrente e deionizada (repetindo o processo 3 vezes) para alcançar o máximo de remoção do solo e da poeira. Depois da etapa de limpeza, as plantas foram colocadas sobre papel toalha na bancada para secagem a temperatura ambiente. Após secagem em temperatura ambiente, aproximadamente 2 horas, as plantas foram segmentadas em raiz e parte aérea (caule e folhas) com auxílio de tesoura de poda. A biomassa das plantas foi aferida em balança de precisão para obtenção do peso úmido.

As amostras segmentadas ficaram secando sobre a bancada por aproximadamente duas semanas e após esse tempo a amostra foi triturada, colocada em cadinho de porcelana de 50 mL (previamente lavados e secos em estufa a 100 °C por 1 hora) e então calcinadas em forno tipo mufla. Na mufla, a temperatura foi aumentada a cada meia hora em 50 °C até alcançar uma temperatura de 600 °C, por um período de 8 a 12 horas. Após a calcinação, o forno foi desligado e mantido fechado pelo mesmo período para resfriamento.

Os cadinhos foram retirados da mufla com pinça metálica e colocados em dessecador por 1 hora para evitar umidade. Em seguida, as amostras, agora em cinzas, foram pulverizadas com auxílio de um pistilo de porcelana. As cinzas foram colocadas em frascos de polietileno (identificados) com tampa de rosca e tiveram sua biomassa aferida – peso em cinza (Figura 23).

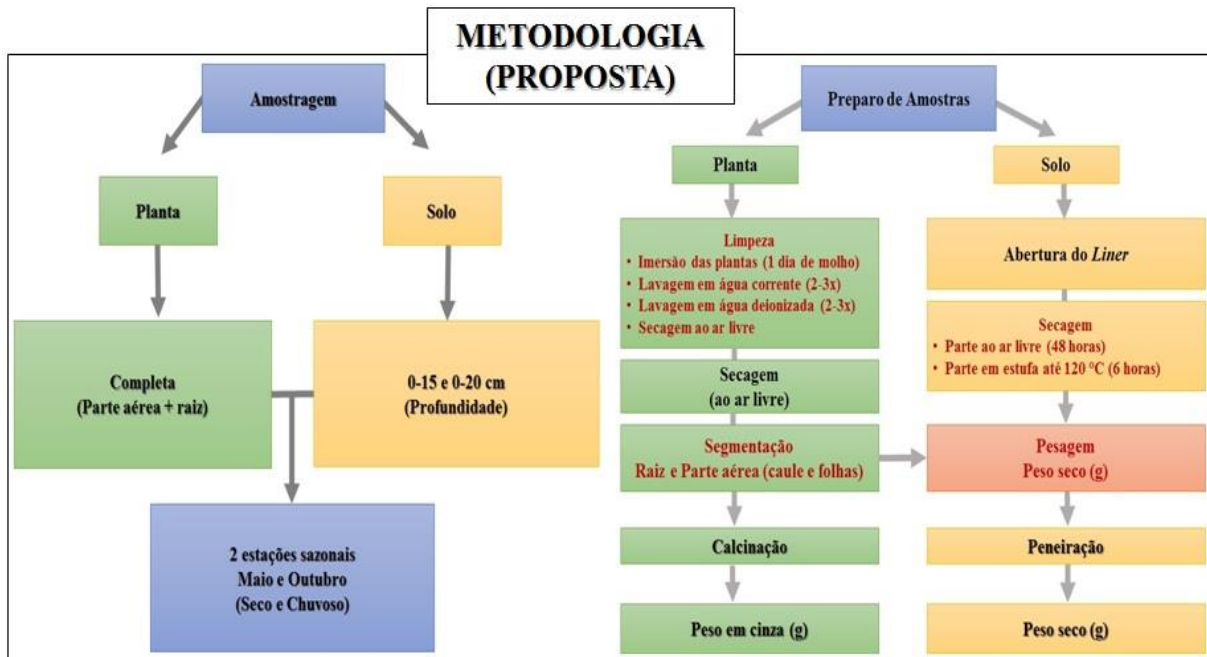
Figura 23: Etapas e procedimentos de preparo das plantas para análise por ativação neutrônica.



Nota: A) Plantas limpas e secas; B) Parte aérea segmentada; C) Raiz segmentada; D) Planta seca e picotada; E) Parte aérea e raiz acondicionadas em cadinhos; F) Aferição do peso seco das amostras; G) Cadinhos posicionados na mufla; H) Amostras calcinadas. Fonte: Autor (2018).

A Figura 24 apresenta as etapas de coleta e preparo das amostras ambientais, realizadas neste estudo, como verificação da metodologia de trabalho do PMA/CDTN.

Figura 24: Etapas de coleta e preparo de amostras ambientais (planta e solo) sugeridas para metodologia de trabalho do PMA/CDTN.



Fonte: Esquema elaborado pelo Autor (2018).

7.3 ETAPA 2 – AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO, TRANSLOCAÇÃO E ACUMULAÇÃO DE Th e U PELAS PLANTAS UTILIZADAS NA METODOLOGIA DE ANÁLISE DA RADIAÇÃO NATURAL PELO PMA/CDTN EM AMBIENTE CONTROLADO

Esta etapa consistiu na verificação da capacidade das espécies utilizadas no PMA/CDTN, quando submetidas a experimentos controlados, em absorver, translocar e acumular Th e U. O objetivo é verificar quão resistentes as espécies possam ser em condições distintas de cultivo e ao nível de dose aplicada (alta, média ou baixa) dos elementos de interesse. O experimento foi realizado, em dois ensaios, em ambiente parcialmente controlado (Casa de Vegetação) utilizando-se de duas técnicas de cultivo vegetal:

- Ensaio I – cultivo em solução nutritiva (hidroponia)
- Ensaio II – cultivo em solo com alto teor natural de Th e U.

Ambas as técnicas foram executadas em períodos sazonais distintos – período seco/frio e período chuvoso/quente. As duas espécies utilizadas nas análises de campo do PMA/CDTN

– *Urochloa brizantha* e *Cynodon dactylon* foram submetidas ao cultivo tanto em solução nutritiva quanto no solo.

7.3.1 Ensaio I – Cultivo em solução nutritiva

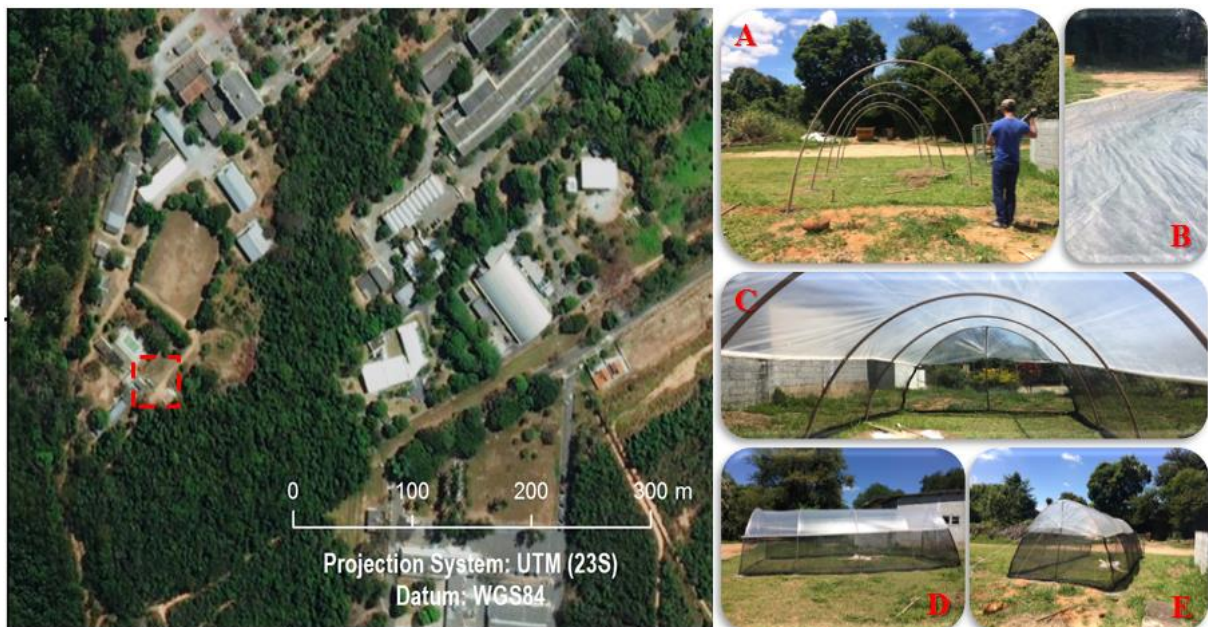
7.3.1.1 Passos para realização do experimento

A Casa de Vegetação

O objetivo de realizar um estudo em Casa de Vegetação (ou estufa) é atender as necessidades dos vegetais estudados controlando as condições ambientais (temperatura, vento, pragas etc.). No contexto deste estudo as condições ambientais foram parcialmente controladas, uma vez que a estufa não dispunha de controle da temperatura.

A casa de vegetação utilizada nesse estudo foi estabelecida em uma área específica do CDTN – Latitude: 19°52'32" S; e Longitude: 43°58'14" O (Figura 25).

Figura 25: Localização (esquerda) e etapas de construção da Casa de Vegetação (direita) para realização de estudos controlados (cultivo em hidroponia e cultivo em solo) na verificação da capacidade de absorção, translocação e acumulação dos elementos de interesse pelas espécies estudadas.



Nota: A) Fundações e arcos estruturais; B) Preparação da cobertura; C) Visão interna da estufa; D) Visão lateral da estufa; E) Visão frontal da estufa. Fonte: Imagem (fragmento) do Núcleo de Pesquisa em Geotecnologias e Modelagem Ambiental (SEAMA/CDTN). Fonte: Fotografias do Autor (2017).

Ela foi construída em terreno plano com farta incidência solar (sentido L-O) diária. A estrutura, com as dimensões 5 x 3 x 2 m (comprimento – altura – largura) possui, em seu

interior, espaço para trabalhar com até 2 bancadas de 4,5 m de comprimento por 0,8 m de largura, posicionadas nas laterais internas da mesma a 1 m do chão.

O seu projeto baseou-se em informações da literatura (SANTOS e MINAMI, 2002). Ela foi feita com cobertura no formato de arco, possibilitando melhor captação de luz da energia solar incidente e recoberta por material plástico opaco (semi-transparente) combinado a uma tela de sombreamento para auxiliar na ventilação interna e controlando a entrada de insetos. Tais condições propiciaram um bom desenvolvimento dos vegetais estudados.

A solução nutritiva

O cultivo em solução nutritiva foi uma das técnicas escolhidas para um dos testes de verificação das espécies utilizadas no PMA/CDTN. O sistema hidropônico utilizou-se de solução nutritiva conforme Hoagland e Arnon (1950) diluída em água deionizada em vasos de 2,5 L (Quadro 4).

Quadro 4: Sais utilizados na composição da Solução Nutritiva para o crescimento das espécies submetidas ao estudo controlado em casa de vegetação (cultivo hidropônico).

Soluções estoque	Concentração (mol L⁻¹)
NH ₄ H ₂ PO ₄	1,0
KNO ₃	1,0
Ca(NO ₃) ₂ . 4H ₂ O	1,0
MgSO ₄ .7H ₂ O	1,0
K ₂ SO ₄	0,5
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ . H ₂ O	0,5
CaSO ₄ .2H ₂ O	0,01
Mg(NO ₃) ₂ . 6H ₂ O	1,0
NH ₄ NO ₃	1,0
Solução A ⁽¹⁾	Sol. mista ⁽¹⁾
Solução de Fe-EDTA ⁽²⁾	Sol. mista ⁽²⁾

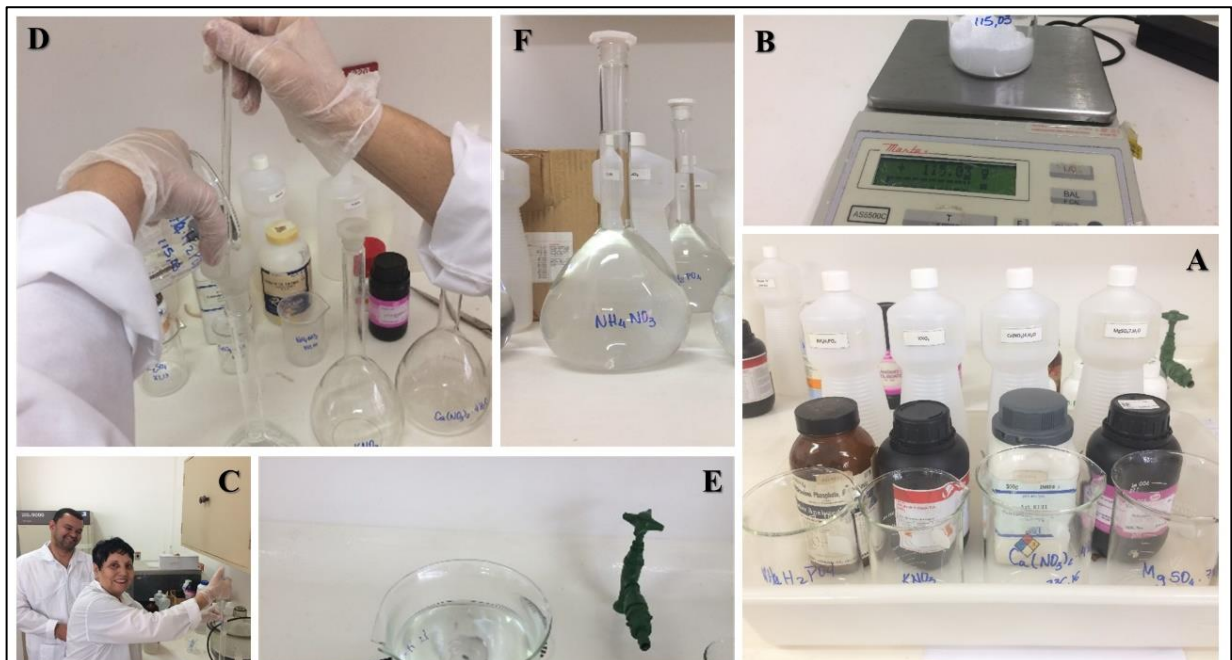
Fonte: Hoagland e Arnon (1950).

Nota⁽¹⁾: Solução A – Composição química da solução de micronutrientes: 2,86g H₂BO₃; 2,43g MnSO₄.H₂O; 0,22g ZnSO₄.7H₂O; 0,08g CuSO₄.5H₂O; 0,02g (NH₄)₆Mo₇O₂₄. Os compostos foram solubilizados separadamente, transferidos para um balão completando-se a 1L com água deionizada (HOAGLAND e ARNON, 1950).

Nota⁽²⁾: Solução de Fe-EDTA – Solução 1, A solução foi preparada com 26,1g de EDTA dissolvida em 500mL de H₂O aquecida. Após resfriada, foi adicionado 89,2 mL de solução de NaOH 0,1N sob agitação constante. Solução 2, 24,9g de FeSO₄.7H₂O dissolvido em 150mL

de água deionizada. Misture as soluções (1) e (2) e em seguida, complete-a para 1L (HOAGLAND e ARNON, 1950). Inicialmente, a preparação da solução nutritiva consistiu em reunir os sais exigidos na tabela de Hoagland e Arnon (1950). Em seguida, os sais foram pesados dentro das medidas também contidas na tabela dos referidos autores. No laboratório, os sais foram diluídos e preparados individualmente em água deionizada para formar os reagentes que irão compor a solução nutritiva. A figura 26 apresenta algumas etapas desta preparação da solução nutritiva conforme descrita por Hoagland e Arnon (1950) para ser utilizada no cultivo hidropônico.

Figura 26: Procedimentos de preparo da solução nutritiva empregada no estudo controlado com cultivo em hidroponia para verificação da capacidade de absorção, translocação e acumulação dos elementos de interesse pelas espécies estudadas.



Nota: A) Sais utilizados no preparo da solução nutritiva; B) Pesagem dos sais nas proporções recomendadas para solução nutritiva; C) Equipe técnica do laboratório de química analítica do CDTN; D) Diluição dos reagentes; E) Agitador para auxiliar na diluição dos reagentes; F) Reagentes preparados. Fonte: Fotografias do Autor (2017).

Obtenção das mudas

As gramíneas *Urochloa brizantha* e *Cynodon dactylon* foram obtidas a partir das mudas, coletadas no campo, nos pontos CPOR, CDTN-1 e CDTN-2, com medidas entre 5 e 10 cm.

Cultivo

As mudas separadas em touceira (*Urochloa brizantha*) e estolões (*Cynodon dactylon*) foram colocadas em copos descartáveis de 50 mL, perfurados no fundo, fixados numa base de isopor colocada sobre os vasos de 2,5 L. Apenas as raízes foram expostas à solução nutritiva.

Tratos culturais

Neste período, as mudas (10 por vaso) eram apenas regadas manualmente com água deionizada, três vezes na semana. A solução nutritiva foi trocada no 15º dia, após o início do cultivo.

7.3.1.2 Preparo das plantas cultivadas em solução nutritiva (hidroponia)

No 20º dia de cultivo em solução nutritiva foi verificada a falta de resposta por parte das mudas que se encontravam com uma coloração amarelo-amarronzada, caracterizando a morte do tecido vegetal.

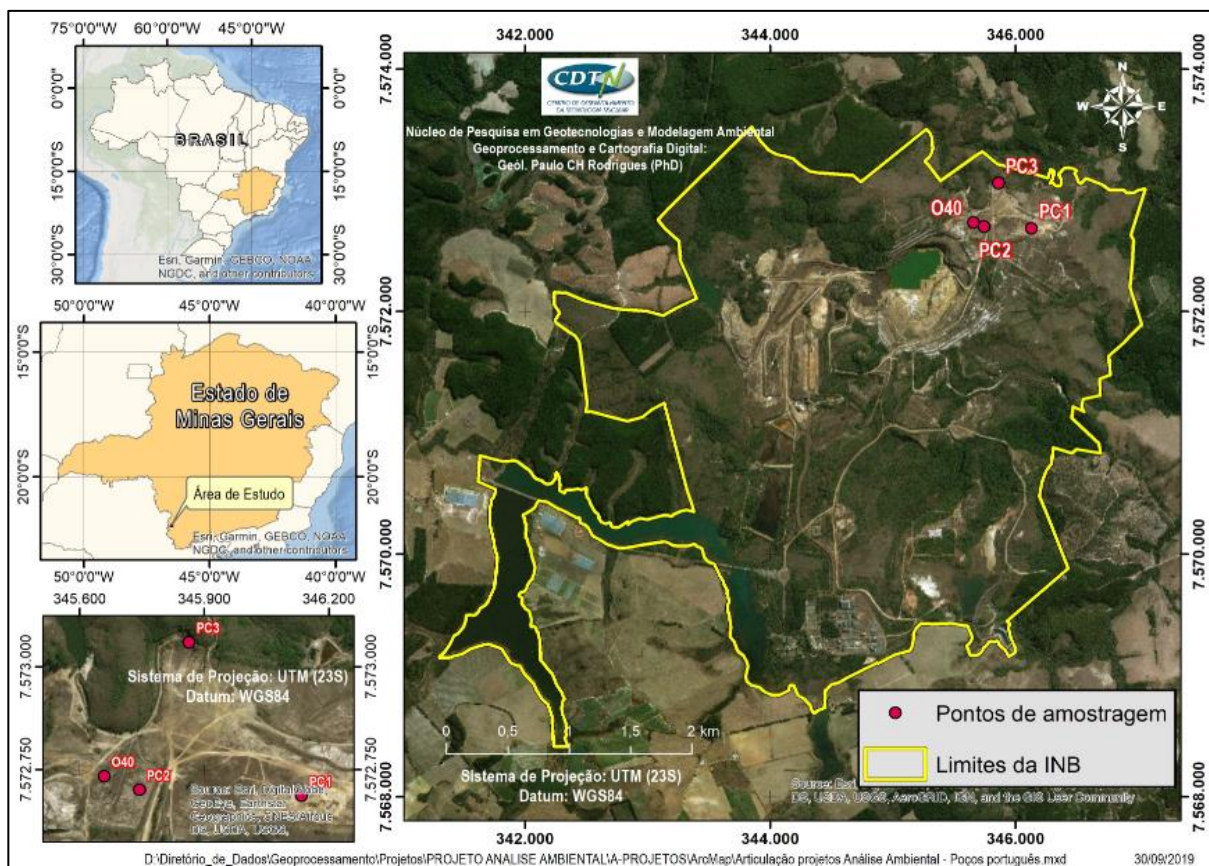
7.3.2 Ensaio II – Cultivo em solo

7.3.2.1 Passos para realização do experimento

Coleta do solo com alto teor natural de U e Th – INB/Caldas

O solo utilizado neste experimento foi coletado da pilha de rejeitos – Bota-Fora 4 (BF-4) – da primeira mina de urânio do Brasil, Osamu Utsumi (Figura 27).

Figura 27: Ponto de coleta das amostras de solo no Bota-fora 4 da Mina de Urânio Osamu Utsumi, INB/Caldas-MG.



Fonte: Núcleo de Pesquisa em Geotecnologias e Modelagem Ambiental SEMAM/CDTN.

A mina, de propriedade das Indústrias Nucleares do Brasil – INB/Caldas, localizada na região de Poços de Caldas, aproximadamente 460 km de Belo Horizonte, Minas Gerais, encontra-se em processo de descomissionamento (FERNANDES, 1997; FRAENKEL, 1985).

O BF-4, que está situado próximo à cava da mina, foi a primeira pilha de rejeito oriunda da mineração de U e por consequência é também o maior dentre todos os que foram formados ao longo do período de operação da mina.

O solo foi amostrado a uma profundidade de 20 cm – Coordenadas X: 345863 e Y: 7573060 – (Figura 28) utilizando-se de um amostrador do tipo *liner*. Após a coleta, o solo foi acondicionado em sacos plásticos e transportados até o Laboratório de Preparo de Amostras do CDTN.

Figura 28: Preparo das amostras de solo coletadas no BF-4 da mina de urânio Osamu Utsumi (INB/Caldas-MG).



A) Secagem do solo; B) Peneiramento do solo; Acondicionamento da amostra do solo quarteadada.

Fonte: Fotografias do Autor (2017).

Preparo do solo com alto teor natural de U e Th – INB/Caldas

No laboratório, inicialmente, o solo foi seco naturalmente, por 48 horas, sobre papel toalha em bandejas de aço inoxidável e em seguida, numa etapa complementar, seco em forno durante 6 horas a uma temperatura de 120 °C.

Após a secagem, o solo foi peneirado em malha de 250 *mesh* e uma composição ideal da amostra (homogênea) foi obtida a partir do quarteamento do material. Uma alíquota representativa do solo seco foi acondicionada em frasco de polietileno (descontaminados) com tampa de rosca, identificado e encaminhada para análise (Figura 28).

Análise mineralógica e físico-química do solo – INB/Caldas

Para conhecimento das características do solo oriundo da região de Poços de Caldas, uma avaliação mineralógica e físico-química foi realizada utilizando-se de técnicas como a Difração de Raios-X e a Microscopia Eletrônica de Varredura. Além disso, foi realizada uma análise do pH dele.

a) Difração de raios-X (DRX)

Os padrões mineralógicos obtidos por DRX foram coletados usando um RIGAKU®, modelo D/MAX-Ultima, com Θ - Θ goniômetro, 0,80 kW. A característica mineralógica foi determinada a partir de uma pequena alíquota de amostra seca e moída (em pó) em ágata. As fases mineralógicas foram coletadas na faixa de 2θ variando de 4° a 80° a uma velocidade de varredura de $2\theta/\text{min}$, intensidade de corrente de 30 mA e tensão de 40 kV, usando uma fonte de radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$). A identificação das fases minerais foi realizada utilizando o software Jade e a base de dados PDF2.

b) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As associações minerais foram caracterizadas no microscópio eletrônico de varredura Zeiss Sigma VP FE (SEM) usando uma combinação de detector de dispersão de fundo e sistema de espectrômetro de dispersão de energia (EDS). As amostras foram preparadas como seção fina polida de grãos e revestidas com um filme de carbono. A digitalização prosseguiu em condições de alto vácuo operando com tensão de aceleração de 10 kV e tamanho de abertura de $60 \mu\text{m}$.

c) Avaliação do pH

Os valores de pH na amostra de solo também foram obtidos utilizando um eletrodo de vidro em uma suspensão de $1V_{\text{solo}} : 5V_{\text{água}}$ (10 g: 50 mL, volume fracionado) de solo em água destilada (pH em H_2O Pura), em 1 mol / L, solução de cloreto de potássio (pH em KCl), agitada por 1 hora em multi-agitador da marca Brinkmann Horizon® e seguida de 1 hora e 30 min de

repouso, fechada com filme plástico, sem contato com o ar (ISO, 2005). A medição foi feita com o eletrodo acoplado a um multiparâmetro - DIGIMED DM-20[®] - medidor de pH. As duas espécies utilizadas nas análises de campo do PMA/CDTN (*Urochloa brizantha* e *Cynodon dactylon*) foram testadas no experimento controlado no solo com alto teor de Th/U.

Obtenção das mudas

As plantas foram obtidas conforme descrito no item 7.3.1.1. (Obtenção de Mudanças).

Cultivo

As touceiras e estolões foram transplantadas para o solo em vasos de 2,5 L. O solo utilizado (INB/Caldas), previamente homogeneizado, foi umedecido apenas com água deionizada.

Tratos culturais

As plantas (10 mudas por vaso) foram regadas manualmente com água deionizada, três vezes na semana. Paralelamente ocorria a remoção de folhas secas, se houvesse.

7.3.2.2 Preparo das plantas cultivadas em solo com teor naturalmente elevado de U e Th (INB-Caldas/MG)

Após o período de dois meses, todas as plantas foram coletadas dos vasos, deixadas de molho e lavadas em água deionizada para completa remoção do solo das suas raízes. Em seguida foram identificadas e levadas para o laboratório de preparação de amostras ambientais. No laboratório, as plantas passaram pelos mesmos procedimentos metodológicos aplicados na Etapa 1 deste trabalho.

7.4 ETAPA 3 – ESTABELECIMENTO DE ESPÉCIE BIOMONITORA COM CAPACIDADE DE ABSORVER, TRANSLOCAR E ACUMULAR Th E U COMO COMPLEMENTO A METODOLOGIA DE ANÁLISE DA RADIOATIVIDADE NATURAL DO PMA/CDTN

Esta etapa consistiu em avaliar uma espécie local como biomonitora com capacidade de absorver, translocar e acumular os elementos de interesse para a monitoração do meio ambiente em relação a radioatividade natural.

Dentre muitas espécies presentes no bioma que compõe a área do CDTN, uma destacou-se por apresentar as principais características para uma espécie biomonitora ideal (JOHNSON *et al.*, 1993):

- É de fácil reconhecimento;
- Distribuição geográfica ampla;
- Farta abundância na área e de fácil coleta;
- Não é uma espécie sazonal (espécie perene);
- Possui porte de pequeno a mediano.

A espécie *Epipremnum pinnatum* foi submetida a experimentos controlados para verificação da sua capacidade de absorver, translocar e acumular Th e U em condições distintas de cultivo e em níveis de dose variável (alta, média ou baixa) dos elementos de interesse.

O experimento foi realizado também, em dois ensaios, em ambiente parcialmente controlado (Casa de Vegetação) utilizando-se de duas técnicas de cultivo: a) Ensaio I – cultivo em solução nutritiva (hidroponia); e b) Ensaio II – cultivo em solo com alto teor natural de Th e U. Ambas as técnicas foram executadas em períodos sazonais distintos – período seco/frio e período chuvoso/quente.

7.4.1 Ensaio I – Cultivo em solução nutritiva

Esta etapa foi realizada utilizando-se toda a estrutura da ‘Etapa 2’.

7.4.1.1 Passos para realização do experimento

Obtenção das mudas

As amostras da espécie (*E. pinnatum*) foram coletadas inteiras do ambiente natural. Esses exemplares foram denominados como 1ª Geração (nascidas no solo).

Preparo das mudas

As plantas tiveram suas raízes mergulhadas em bandeja plástica com água, por 24 horas, para facilitar a retirada do solo agregado a elas. Em seguida, as plantas foram lavadas 3 vezes em água corrente e depois em água deionizada para remoção total do solo nas raízes e poeira na parte aérea. Essas plantas foram, então, colocadas em vasos de 2,5 L com solução nutritiva.

Tratos culturais

A cada 15 dias a solução nutritiva foi trocada por um período de 60 dias (por observação esse foi considerado um tempo hábil para o crescimento de novas folhas e raízes). As plantas foram regadas manualmente a cada 3 dias.

Após o período de 60 dias, as plantas tiveram suas folhas, caules e raízes adultas (1ª Geração) removidas. Assim, as folhas, caules e raízes jovens (2ª Geração), nascidas em solução nutritiva, não apresentam informações originárias do solo.

Cultivo

As plantas de 2ª Geração ficaram por mais 30 dias apenas na solução nutritiva até que elas alcançassem um tamanho médio. Nesse período a solução nutritiva era completada diariamente com água deionizada. No final do período de 90 dias (entre 1ª e 2ª geração) foram realizadas 6 trocas (renovação) de solução nutritiva.

Tratamentos

Após 90 dias, as plantas de 2ª Geração foram submetidas aos tratamentos com padrões de Th e U por um período de 2 meses. Nesse tratamento, uma nova solução nutritiva diluída em água deionizada foi preparada recebendo adição dos padrões. Foram utilizados padrões de tório e urânio preparados no CDTN de acordo com procedimentos já estabelecidos e conforme descritos na Quadro 5.

Quadro 5: Procedimentos para preparo dos padrões de U e Th utilizados nos experimentos de absorvidade por técnica hidropônica.

PADRÃO	REAGENTES	PROCEDIMENTO	CONCENTRAÇÃO ESTOQUE
²³² Th	Th(NO ₃) ₄ . 5H ₂ O	2,5603g de Th(NO ₃) ₄ . 5H ₂ O calcinado a 980°C, em triplicata de 50 mL, por 2h e posteriormente colocado em solução e padronizado.	1008 µg mL ⁻¹ de Th em meio nítrico 3%.
²³⁸ U	UO ₃	1,20165g de UO ₃ calcinado a 980°C e posteriormente colocado em solução e padronizado.	1117 µg mL ⁻¹ de U ₃ O ₈ em meio de ácido nítrico 10%.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018).

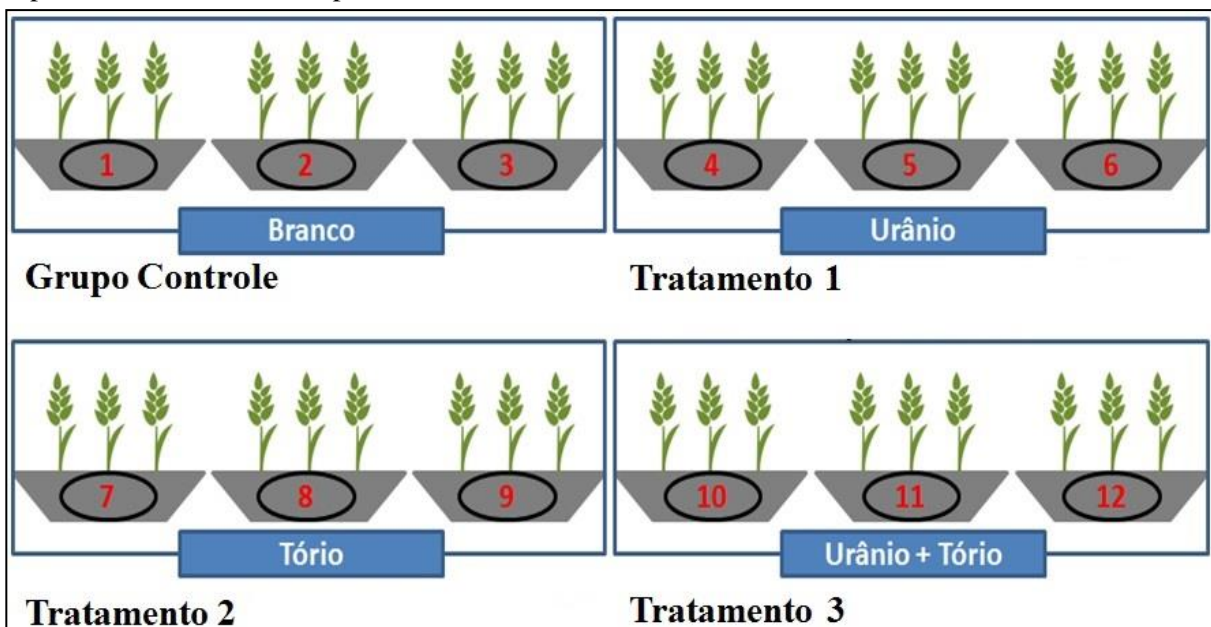
Em um primeiro momento a metodologia para o cultivo das espécies na hidroponia, utilizando-se de solução nutritiva acrescida dos padrões de Th e U, foi realizada aplicando-se três dosagens decrescentes dos respectivos padrões em períodos sazonais diferentes:

- Dose Máxima – 2000 mg kg⁻¹ (Th e U) – período seco/frio.
- Dose Média – 1000 mg kg⁻¹ (Th e U) – período chuvoso/quente.
- Dose Mínima – 500 mg kg⁻¹ (Th e U) – período chuvoso/quente.

7.4.1.2 Aplicação de doses em período seco e frio

A seleção das concentrações de Th e U aplicadas nos tratamentos se baseou na previsão de aproximadamente 800 µg mL⁻¹ por planta (caso todo o elemento fosse absorvido). Caso a absorção fosse de apenas 1%, mesmo assim seria possível analisar por ativação neutrônica. Os tratamentos foram realizados em triplicata, incluindo o branco (Figuras 29-30) por um período de 60 dias. Neste período a solução não foi trocada, recebendo apenas complementação de água (deionizada).

Figura 29: Esquema dos tratamentos aplicados para verificação da capacidade de absorção pelas espécies na técnica de hidroponia.



Fonte: Esquema elaborado pelo Autor (2018).

As espécies de 2ª Geração foram inseridas em solução nutritiva nova contendo os padrões com a Dose Máxima (~ 2000 mg kg⁻¹) para 3 tratamentos como segue:

- Grupo Controle – Sem adição da dose estabelecida para U e/ou Th
0 mg L⁻¹ de U e 0 mg L⁻¹ de Th em 2,5 L⁻¹ de solução nutritiva;

- Tratamento 1 – Somente U (Dose Máxima $\sim 2000 \text{ mg kg}^{-1}$)
2.234 mg L^{-1} de U em 2,5 L^{-1} de solução nutritiva;
- Tratamento 2 – Somente Th (Dose máxima $\sim 2000 \text{ mg kg}^{-1}$)
2.016 mg L^{-1} de Th em 2,5 L^{-1} de solução nutritiva;
- Tratamento 3 – Th + U (Dose máxima $\sim 2000 \text{ mg kg}^{-1}$)
2016 mg L^{-1} de Th e 2.234 mg L^{-1} de U em 2,5 L de solução nutritiva.

Figura 30: Etapas de execução dos experimentos para verificação da capacidade de absorção das espécies estudadas através da técnica de hidroponia.



Nota: A) Pipetagem da solução nutritiva; B) Mesa montada com os respectivos tratamentos; C) Folhas jovens (após 60 dias); D) Raízes jovens (após 60 dias). Fonte: Fotografias do Autor (2018).

7.4.1.3 Aplicação de doses em período chuvoso e quente

Assim como executado na primeira parte do experimento, plantas de segunda geração foram utilizadas em solução nutritiva contendo padrões em duas dosagens inferiores à primeira dosagem que foi de 2000 mg kg^{-1} (Dose máxima) para apenas 1 tratamento (Tratamento 3) como se segue:

- Tratamento 3 – Th + U (Dose Média $\sim 1000 \text{ mg kg}^{-1}$):
1.008 mg L^{-1} de Th e 1.117 mg L^{-1} de U em 2,5 L de solução nutritiva.
- Tratamento 3 – Th + U (Dose Mínima $\sim 500 \text{ mg kg}^{-1}$):
504 mg L^{-1} Th e 558,5 mg L^{-1} de U em 2,5 L^{-1} de solução nutritiva.

Neste segundo experimento, considerou-se desnecessária a repetição do Grupo Controle (Branco). O Tratamento 1 (apenas U) e o Tratamento 2 (apenas Th) também não foram

repetidos, uma vez que esses tratamentos tinham como intuito, apenas, verificar se a planta teria capacidade de absorção individual desses elementos.

Para fins de comparação dos resultados, inclusive com os dos experimentos no solo, o Tratamento 3 (Th + U) é o mais indicado, uma vez que tais elementos são geralmente encontrados juntos no ambiente natural.

7.4.1.4 Preparo das plantas cultivadas na hidroponia

Em ambos os períodos sazonais, após 60 dias, as plantas foram retiradas da solução, lavadas em água deionizada, identificadas e levadas para o laboratório de preparação de amostras ambientais.

No laboratório, as amostras, utilizadas no experimento, foram lavadas 3 vezes em água deionizada com intuito de eliminar a solução adsorvida na superfície das raízes. Em seguida, as plantas foram submetidas a mesma metodologia de preparo de amostras ambientais realizada na Etapa 1.

7.4.2 Parte II: Experimento em solo

7.4.2.1 Passos para realização do experimento

Obtenção das mudas

Como ocorreu no experimento em hidroponia, aqui utilizou-se também de plantas de segunda geração da *Epipremnum pinnatum*, crescidas em solução nutritiva.

Cultivo

As mudas da *E. pinnatum*, após um período de 90 dias na solução nutritiva, foram também transplantadas para o solo em vasos de 2,5 L. O solo utilizado (INB/Caldas), previamente homogeneizado, foi umedecido apenas com água deionizada.

Tratos culturais

Neste período, as plantas (10 mudas por vaso) eram apenas regadas manualmente com água deionizada, três vezes na semana. Paralelamente ocorria a remoção de folhas secas, se

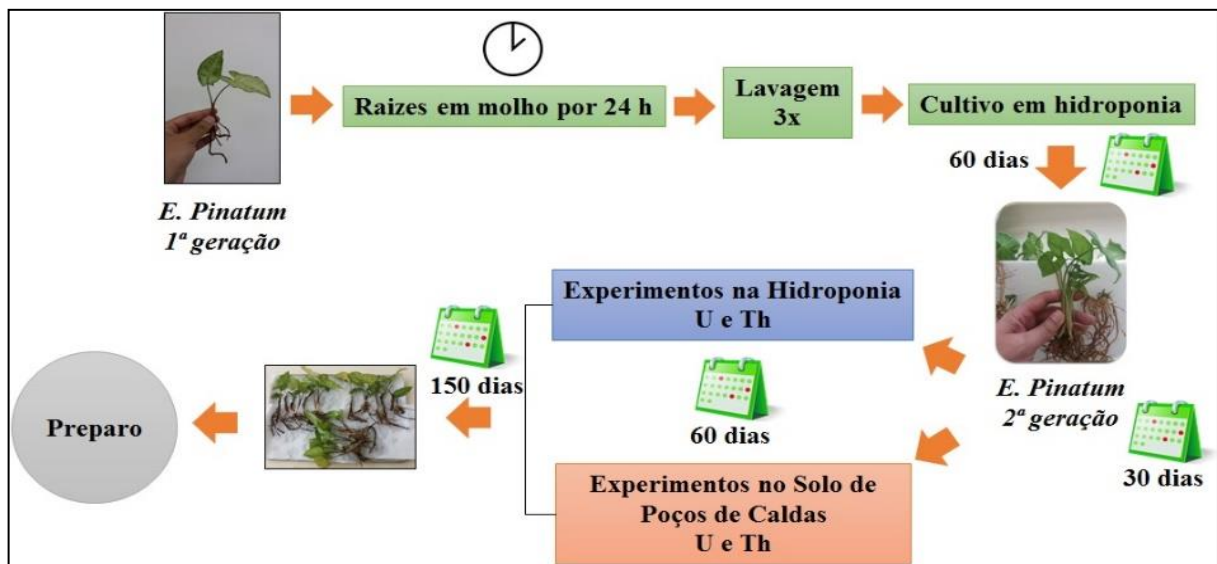
houvesse. O mesmo experimento, sem variação na metodologia aplicada, foi realizado em dois períodos sazonais distintos, em duplicata, por um período de 60 dias.

7.4.2.2 Preparo das plantas cultivadas no solo

Após o período de dois meses, todas as plantas foram coletadas dos vasos, deixadas de molho e lavadas em água deionizada para completa remoção do solo das suas raízes. Em seguida foram identificadas e levadas para o laboratório de preparação de amostras ambientais.

No laboratório, as plantas passaram pelos mesmos procedimentos metodológicos aplicados na Etapa 1 da metodologia deste trabalho. Tanto o experimento controlado realizado na hidroponia quanto o realizado no solo estão sintetizados na Figura 31.

Figura 31: Etapas de desenvolvimento dos experimentos realizados em hidroponia e no solo para verificação da capacidade de absorção das espécies do PMA/CDTN e da candidata a biomonitor.



Fonte: Esquema elaborado pelo Autor (2018).

7.5 ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA, MÉTODO k_0

A análise por ativação neutrônica (método k_0) não requer grandes preparações se comparada a outras técnicas, pois trata-se de uma técnica não destrutiva. No entanto, é necessário que a amostra seja suficientemente homogênea e em quantidade suficiente (tamanho da amostra) para o preenchimento do tubo de porta amostra (PA) no qual será irradiada para posterior análise.

Todas as amostras de solo e plantas, coletadas no campo e/ou utilizadas nos experimentos controlados, juntamente com os respectivos materiais de referência IAEA Soil-7

(IAEA, 2000) e GBW 0805, *Tea Leaves* (NRCRM, 1987) foram analisados aplicando-se a AAN, método k_0 , para a determinação das respectivas frações mássicas de U e Th.

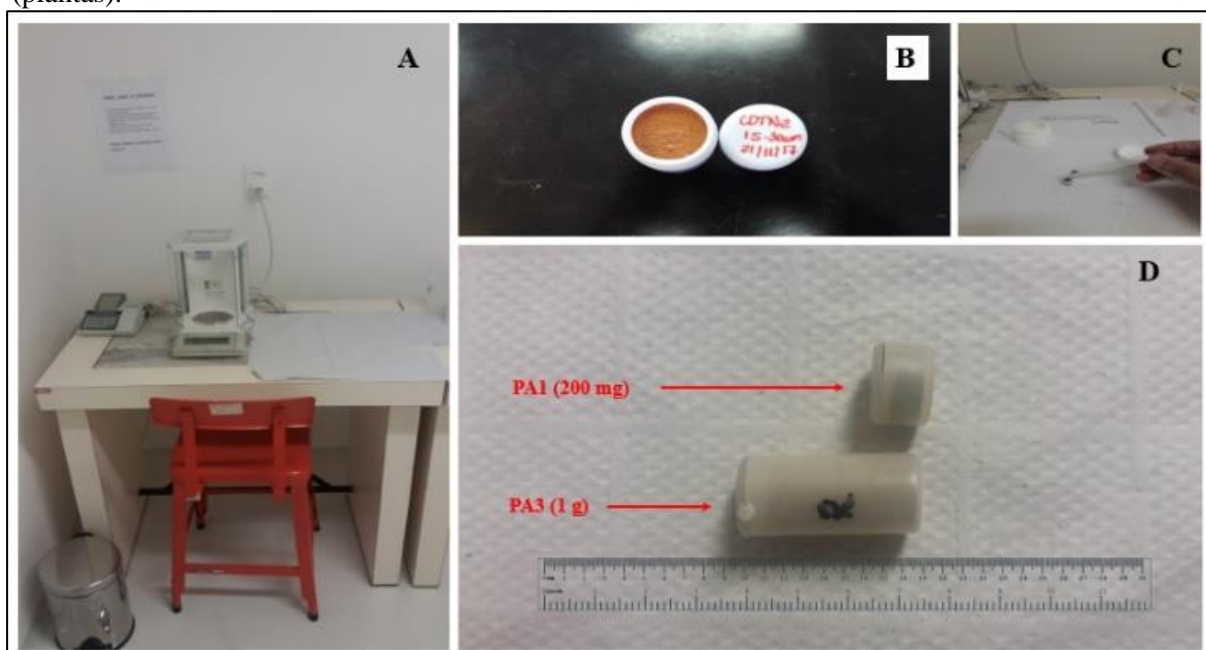
7.5.1 Aplicação da AAN, método k_0

A aplicação do método está dividida em três momentos: pré-irradiação, irradiação e pós-irradiação.

a) Pré-irradiação

As amostras, após preparação descrita no item 7.2.2.2. (Preparo das amostras de solo e plantas – Metodologia de verificação do PMA/CDTN), foram pesadas e acondicionadas nos seus respectivos porta amostras (PA): as plantas em PA3, porta amostra com diâmetro interno de 9,6 mm e altura interna de 15 mm, com capacidade de 1 g de volume da amostra e o solo em PA1, porta amostra com diâmetro interno de 9,6 mm e altura interna de 4,3 mm, com capacidade para 200 mg de volume da amostra. A figura 32 apresenta toda preparação antes da irradiação das amostras.

Figura 32: Amostras pesadas e acondicionadas em seus respectivos porta amostras: PA1 (solo) e PA3 (plantas).

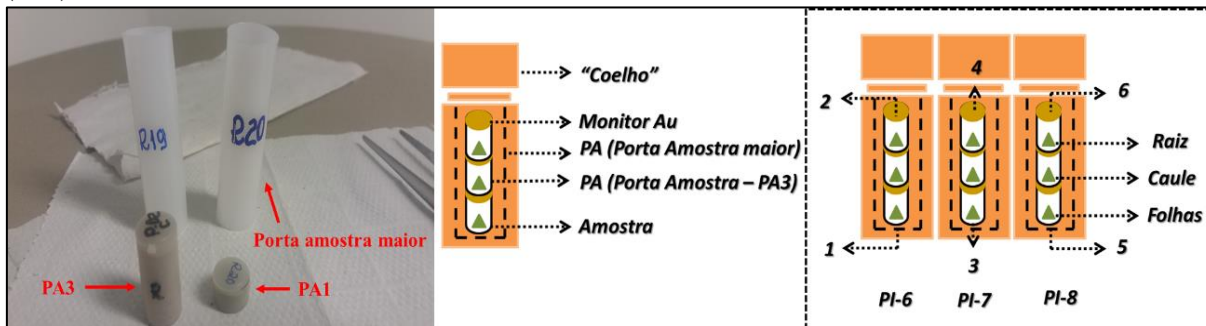


A) Balança de precisão na sala de pesagem; B) Amostra preparada de acordo com o item 7.2.2.4; C) Acondicionamento das amostras em seus respectivos porta amostras; D) PA1 (200 mg) e PA3 (1g).
Fonte: Fotografias do Autor (2018).

Em seguida, foram colocados em porta amostras maiores com diâmetro interno de 9,6 mm e altura interna de 75 mm, intercalados por monitores de fluxo de nêutrons – discos de liga

de Al Au (0,1%), IRMM-530R (SIMONITS *et al.*, 1975; IRRM, 2002) com 6 mm de diâmetro e 1 mm de espessura, conforme esquema demonstrado na figura 33.

Figura 33: Amostras acondicionadas em porta amostras maiores (Esq.) e esquema usado na irradiação (Dir.).



Fonte: Fotografia e desenho esquemático elaborado pelo Autor (2018).

b) Irradiação

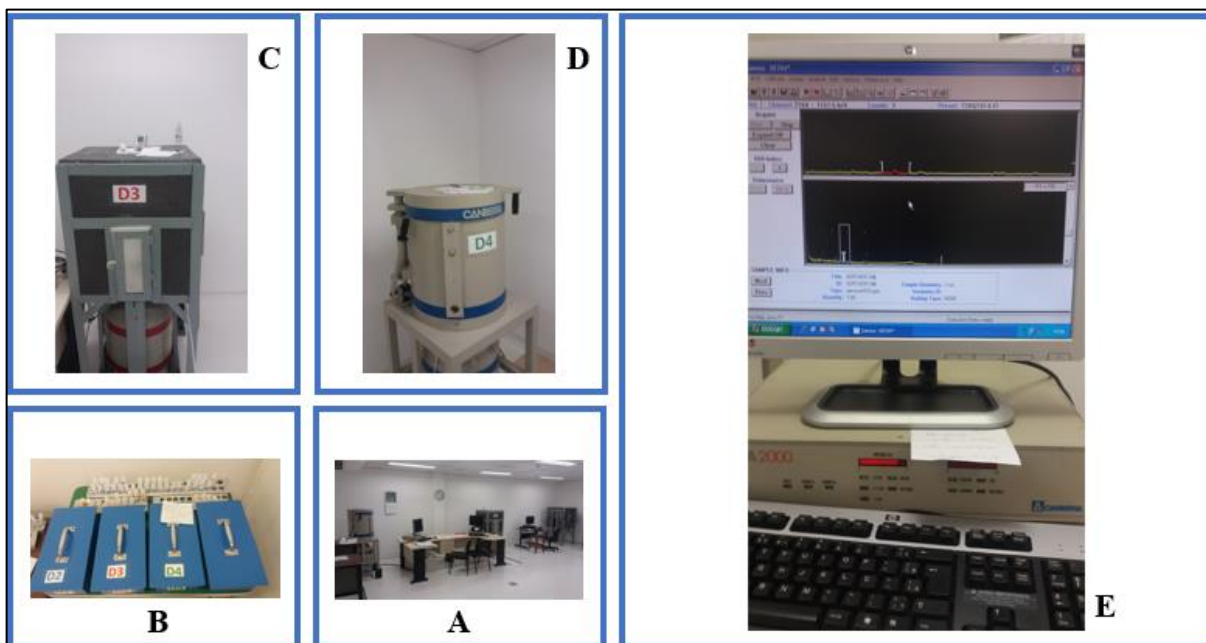
Os porta amostras contendo as amostras e o material de referência foram então inseridos em outro tubo de poliestireno (20 mm de diâmetro interno e 80 mm de altura interna) denominado de "coelho" e levados para irradiação por 8 horas no reator de pesquisa TRIGA MARK I IPR-R1 do CDTN que opera a 100 kW de potência com um fluxo médio de nêutrons térmicos na posição de irradiação PI-7 na mesa giratória, de $6,35 \times 10^{11}$ nêutrons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e parâmetros espectrais f igual a 22,32, e α igual a -0,0022 (MENEZES E JACÍMOVIĆ, 2006; MENEZES E JACÍMOVIĆ, 2011).

c) Pós-irradiação

Espectrometria gama

Após a irradiação e tempo de espera de decaimento adequados, as amostras e os monitores tiveram seus radionuclídeos induzidos medidos por espectrometria gama (5 dias para o ^{239}Np , 20 dias para o ^{233}Pa e 7 dias para o ^{239}Au) no espectrômetro gama composto de detector HPGe com 25% e 50% de eficiência relativa, CANBERRA® (FWHM 1,75 keV) e eletrônica associada. Os espectros foram obtidos com a utilização do programa Gennie 2K, CANBERRA® (Figura 34).

Figura 34: Espectrometria gama das amostras utilizando detectores HPGe e obtenção dos espectros utilizando-se o Gennie 2K, CANBERRA®.

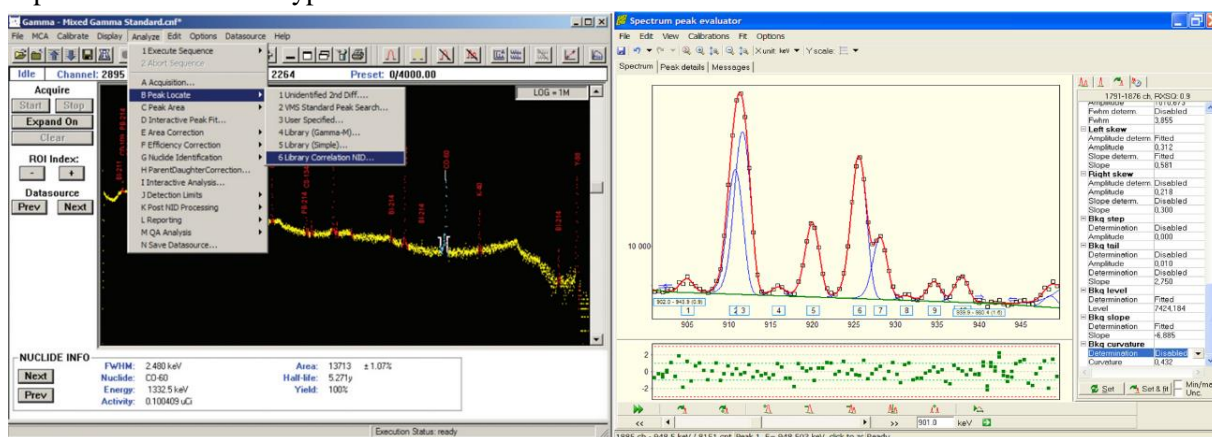


Nota: A) Sala de espectrometria; B) Amostras aguardando contagem; C) Detector HPGe “D3” com 25% de eficiência; D) Detector HPGe “D4” com 50% de eficiência; E) Obtenção dos espectros no Gennie 2K, CANBERRA. Fonte: Fotografias do Autor (2018).

Deconvolução dos espectros

Os espectros gama obtidos dos radionuclídeos de interesse foram analisados e deconvoluídos (Figura 35) nas suas principais energias pelo software HyperLab® V.2009.1.

Figura 35: Aquisição dos espectros utilizando o Gennie 2K CANBERRA (Esq.) e deconvolução dos espectros no software HyperLab V.2009.1.



Fonte: Organizado pelo Autor (2018).

Cálculo das frações mássicas

Os cálculos das frações mássicas dos elementos de interesse foram executados utilizando o pacote do software Kayzero for Windows® V.2.46, específico para o método k_0 .

7.5.2 Descarte do material utilizado nas análises e experimentos

Todo material preparado e analisado no Laboratório de Ativação Neutrônica (solo e plantas) acondicionados nos seus respectivos porta-amostras tiveram o nível de atividade monitorada pelo setor de Tratamento de Rejeitos do CDTN e, após seis meses, foram classificadas como resíduos, segundo a Norma CNEN-NN-3.01 (CDTN, 2011), e tão somente foi permitido o seu descarte. A solução nutritiva, utilizada nos ensaios hidropônicos, contendo padrões de U e Th foram acondicionadas em 3 bombonas de 20 L; identificadas em “Sol. com U”, “Sol. com Th” e “Sol. com U + Th”. Cadastradas no sistema do setor de Tratamento de Rejeitos e armazenadas no depósito de rejeitos de baixa atividade do CDTN.

O solo originário do BF-4 da mina de urânio Osamu Utsumi (INB-Calda) contendo teores naturalmente elevados de U e Th também foram reportados ao setor de Tratamento de Rejeitos (cadastrados e armazenados). O solo oriundo da própria área do CDTN foi acondicionado em sacolas plásticas e monitorados pelo setor de Tratamento de Rejeitos do CDTN.

7.6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO LABORATÓRIO DE ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA NA APLICAÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO

A avaliação de desempenho do laboratório na aplicação do método k_0 de ativação neutrônica é realizada ao se analisar amostra de material de referência aplicando o mesmo procedimento que é aplicado às amostras em estudo. O teste estatístico aplicado é o do parâmetro erro normalizado, E_n -score (ISO 13528, 2005), uma vez que o certificado do material fornece os valores certificados/recomendados de fração mássica acompanhados de sua incerteza expandida U ($k = 2$). Esse parâmetro é calculado segundo a equação 5:

$$E_n = \frac{x_{\text{lab}} - x_{\text{cert}}}{\sqrt{U^2_{\text{lab}} + U^2_{\text{cert}}}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Na qual:

- x_{lab} é o valor obtido pelo laboratório;

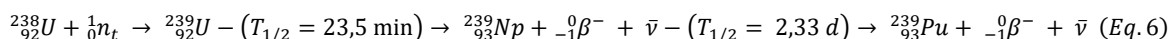
- x_{cert} é o valor certificado;
- U_{lab} é a incerteza expandida do valor obtido pelo laboratório ($k = 1$);
- U_{cert} é a incerteza expandida do valor certificado ($k = 2$).

A avaliação por meio do E_n -score é realizada com base nos seguintes critérios:

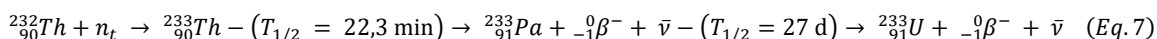
- i. $|E_n| \leq 1$, resultado satisfatório, indicando que o resultado obtido possui 95 % de probabilidade estar dentro da faixa do valor certificado;
- ii. $|E_n| > 1$, resultado insatisfatório.

As reações de ativação por nêutrons térmicos estão representadas nas equações 6 e 7 e suas principais energias pelo quadro 6:

- Para o urânio (BURNS e FINCH, 1999)



- Para o tório: (BURNS e FINCH, 1999)



Quadro 6: Biblioteca com as energias dos isótopos originados a partir das reações de ativação por nêutrons térmicos no método k_0 .

ISÓTOPO	ENERGIA	FATOR k_0	NUCLÍDEOS INTERFERENTES
²³³Pa	75,4	9,190E-4	²³⁹ U
	86,8	1,300E-3	¹⁶⁰ Tb; ¹⁰⁹ Ag-m
	94,7	7,180E-3	⁶⁵ Ni-D; ⁶⁵ Zn-D; ¹⁶⁹ Yb; ¹⁶⁵ Dy
	98,4	1,120E-2	¹⁵³ Gd; ¹⁵³ Sm; ⁴⁶ Sc-D; ¹⁸² Ta-D
	103,9	4,850E-4	¹⁵³ Gd; ¹⁵³ Sm; ²³⁹ Np; ¹⁵⁵ Sm; ¹⁵¹ Pm
	104,0	5,750E-4	¹⁵³ Gd; ¹⁵³ Sm; ²³⁹ Np; ¹⁵⁵ Sm; ¹⁵¹ Pm
	114,4	1,450E-3	¹⁸² Ta; ¹⁷⁵ Yb; ¹⁴⁹ Nd
	300,1	4,370E-3	-
	311,9*	2,520E-2	¹⁰⁹ Pd-X; ¹⁰⁹ Pd; ⁴² K
	340,5	2,950E-3	¹⁵¹ Pm; ⁹⁷ Zr-D
	375,4	4,490E-4	-
	398,5	9,260E-4	¹⁴⁷ Nd
	415,8	1,160E-3	¹¹¹ Pd-m; ⁷⁷ Ge; ¹¹⁶ In-m
	²³⁹Np	103,7	4,780E-3
106,1		6,520E-3	¹⁸⁸ Re-m
209,8		7,800E-4	¹⁵¹ Pm; ¹⁸² Ta-D; ¹⁷¹ Er; ⁷⁷ Ge
226,4		5,360E-5	¹⁵⁹ Gd
228,1		2,760E-3	¹¹⁰ Mo-D; ¹⁸² Ta
228,2*		2,710E-3	¹¹⁰ Mo-D; ¹⁸² Ta
277,6*		3,400E-3	-
285,8		1,830E-4	¹⁴⁹ Pm
315,9		3,680E-4	¹⁶¹ Gd; ¹¹⁷ In-m; ¹⁰⁵ Ru; ¹⁹⁹ Pt
334,2		4,810E-4	⁵⁹ Fe

(*) Principais energias utilizadas no cálculo pelo Kayzero for Windows. Fonte: Organizado pelo Autor, 2019.

7.7 CÁLCULO DA ATIVIDADE DOS RADIONUCLÍDEOS DE INTERESSE

Ao processo de decaimento radioativo de um dado isótopo em relação ao seu tempo de meia vida é o que é comumente chamado de atividade. Além de conhecer o tempo que levará um radionuclídeo até alcançar a sua estabilidade, o cálculo dessa atividade é importante também para a verificação do nível da radioatividade a que um organismo pode estar sendo exposto quando da presença desse radionuclídeo (KAPLAN, 1978; IAEA, 2010).

Para calcular a atividade dos elementos de interesse neste estudo utilizou-se a fração mássica (mg kg^{-1}) obtida a partir da análise por ativação neutrônica, a constante de Avogadro e os dados nucleares dos seus principais isótopos – ^{238}U e ^{232}Th , como se segue abaixo.

Cálculo da atividade de U natural

Os três isótopos radioativos de U na natureza possuem abundância relativa e meias vidas específicas (Quadro 7).

Quadro 7: Abundância dos isótopos de U natural e suas respectivas meias vidas.

ISÓTOPO	ABUNDÂNCIA (%)	MEIA VIDA (Anos)
^{234}U	0,0054	$2,46 \times 10^5$
^{235}U	0,7204	$7,04 \times 10^8$
^{238}U	99,2742	$4,47 \times 10^9$

A atividade dos três isótopos naturais do U varia em função da massa ou do número de átomos que os compõe (Quadro 8).

Quadro 8: Número de átomos em 1g da amostra e a atividade dos isótopos de U natural.

ISÓTOPO	Nº DE ÁTOMOS	ATIVIDADE (Bq)
^{234}U	$1,38 \times 10^{17}$	12437,74794
^{235}U	$1,84 \times 10^{19}$	576,1671959
^{238}U	$2,51 \times 10^{21}$	12352,6922

Assim, a cada 1g de U natural sua atividade será de 25366,6073 Bq, que é o somatório das atividades dos três isótopos que o compõe na natureza. No caso deste estudo, para o cálculo da atividade, utilizou-se apenas os dados nucleares referentes ao isótopo ^{238}U (12352,6922 Bq).

Cálculo da atividade de Th natural

Ao contrário do U, o Th possui um único isótopo natural. Sendo assim, sua abundância relativa é de 100 %, porém com uma meia vida menor que a do isótopo de U mais abundante (Quadro 9).

Quadro 9: Abundância do isótopo de Th natural e sua respectiva meia vida.

ISÓTOPO	ABUNDÂNCIA (%)	MEIA VIDA (Anos)
^{232}Th	100	$1,40 \times 10^{10}$

A atividade do isótopo natural do Th também vai variar em função da massa ou do número de átomos que os compõe (Quadro 10).

Quadro 10: Número de átomos em 1g de amostra e a atividade do isótopo de Th natural.

ISÓTOPO	Nº DE ÁTOMOS	ATIVIDADE (Bq)
^{232}Th	$2,5944 \times 10^{21}$	4073,127539

Assim, a cada 1g de Th natural sua atividade será de 4073,1275 Bq.

7.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para todos os resultados, estatisticamente apresentados nas tabelas e gráficos disponibilizados no item 8 (Resultados e Discussão), a metodologia utilizada foi a ANOVA (MONTGOMERY, 2017) por se tratar de uma análise descritiva (inferencial) do perfil geral dos dados obtidos neste estudo. O software R versão 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018) foi o escolhido para realização de todas as análises estatísticas. Nas tabelas estão registradas uma análise exploratória de variáveis quantitativas, medidas de posição e variação relativa muito comuns para cada fator avaliado, como os valores das médias (\bar{M}) e seus respectivos desvios padrões (DP). O DP dá a ideia de variabilidade em relação à \bar{M} que, por sua vez, é mais sensível às discrepâncias dos valores obtidos.

Portanto, para representação gráfica utilizou-se da média (\bullet) e seus respectivos intervalos de confiança (\cdot e \cdot) de 95%. Aplicou-se a transformação logarítmica (\log^{10}) nas duas variáveis resposta (fração mássica e atividade), buscando controlar a elevada variabilidade de ambas. Utilizou-se também da correção de Tukey (*Test post-hoc*) nas comparações múltiplas par-a-par (*pairwise*). Trata-se de um teste de comparação muito rigoroso utilizado para testar toda e qualquer diferença entre duas médias de tratamento. As diferenças significativas podem

ser verificadas pelas letras acima de cada grupo (a e b), onde grupos que compartilham a mesma letra não possuem diferenças significativas entre si. As comparações devem ser feitas apenas entre grupos dentro do mesmo quadro. Em todos os testes assumiu-se um nível de significância de 5%.

7.9 MATERIAIS UTILIZADOS

Todos os materiais utilizados nas etapas descritas neste capítulo estão discriminados no APÊNDICE.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO LABORATÓRIO DE ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA

A avaliação do desempenho do método k_0 de ativação neutrônica, aplicado neste estudo, foi realizada através do teste estatístico E_n -score (ISO 13528, 2005). Foram analisadas amostras de materiais de referência, o GBW 0805, *Tea Leaves* (NRCRM, 1987) e IAEA-SOIL 7 (IAEA, 2000) aplicando o mesmo procedimento utilizado para as amostras em estudo. Todos os resultados experimentais são expressos com a incerteza combinada padrão (“Combined Standard Uncertainty”, $[k = 1]$) de acordo com o GUM (INMETRO, 2012).

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para U e Th nos materiais de referência. Observa-se que os valores de E_n -score são menores do que 1, indicando que o desempenho do laboratório em aplicar o método k_0 está satisfatório.

Tabela 1: Resultados experimentais e valores recomendados dos materiais de referência, GBW 0805 e IAEA-SOIL 7.

	GBW0805 (Tea leaves)			IAEA-SOIL 7		
	Resultados Experimentais [$k = 1$] (mg kg ⁻¹)	Valores Recomendados [$k = 2$] (mg kg ⁻¹)	E_n -score	Resultados Experimentais [$k = 1$] (mg kg ⁻¹)	Valores Recomendados [$k = 2$] (mg kg ⁻¹)	E_n -score
Th	0,111 ± 0,003	0,105 ± 0,013	0,45	8,1 ± 0,3	8,2 ± 0,5	0,32
U	< 2	NR	-	2,4 ± 0,1	2,4 ± 0,35	0,74

El., Elemento; <, Menor do Que; NR, Não Reportado.

8.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados da avaliação estatística estão explicitados ao longo das discussões.

8.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO (INB-CALDAS)

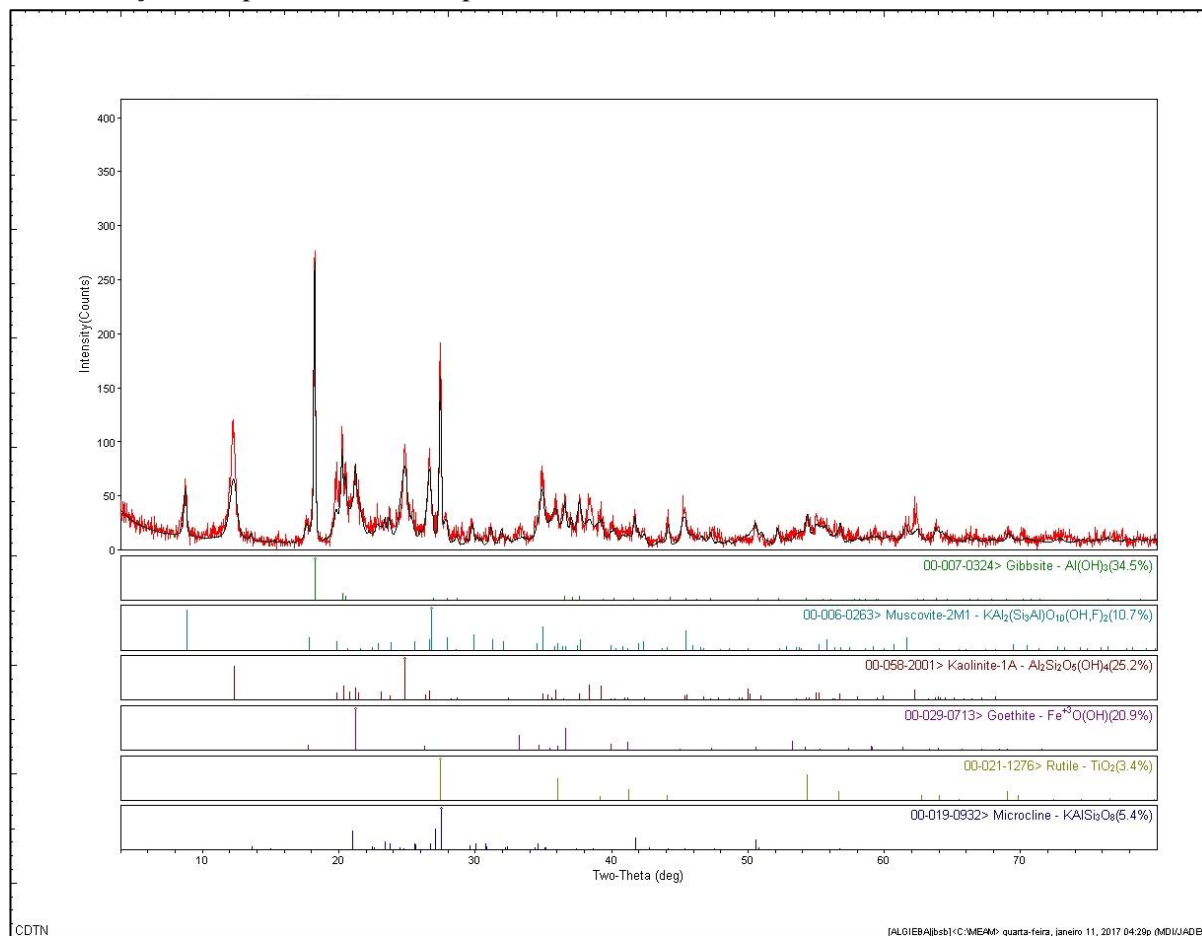
Este item apresenta os resultados para as características mineralógicas e físico-químicas do solo utilizado no experimento de verificação das plantas analisadas no PMA/CDTN e no experimento de caracterização da espécie biomonitora para presença de U e Th no meio ambiente.

8.3.1 Avaliação mineralógica do solo (INB-Caldas)

A análise mineralógica pela Difração por Raio X (DRX) mostrou fases muito similares para as frações do solo utilizadas neste experimento.

No solo há predominância de Gibbssita – $\text{Al}(\text{OH})_3$, Caulinita - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, Goetita - $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$, Muscovita - $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ e K-Feldspato - KAlSi_3O_8 . Em determinadas frações observa-se que o Rutilo - TiO_2 entra em competição com o K-Feldspato - KAlSi_3O_8 . Essas fases podem ser vistas no difratograma (Figura 36).

Figura 36: Difratoograma com as fases mineralógicas caracterizadas do solo, oriundo da mina da INB-Caldas/MG, utilizado nos experimentos controlados de verificação das espécies do PMA/CDTN e de caracterização da espécie biomonitora para U e Th.



Fonte: Laboratório de Difração de Raio-X do CDTN.

Como complemento às análises pela DRX, a análise mineralógica por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) mostrou que os fragmentos de solo são formados por agregados irregulares ou arredondados. É composto por vários grãos minerais embutidos em massa argilosa. Os nódulos arredondados têm núcleos porosos e representam uma característica pedológica.

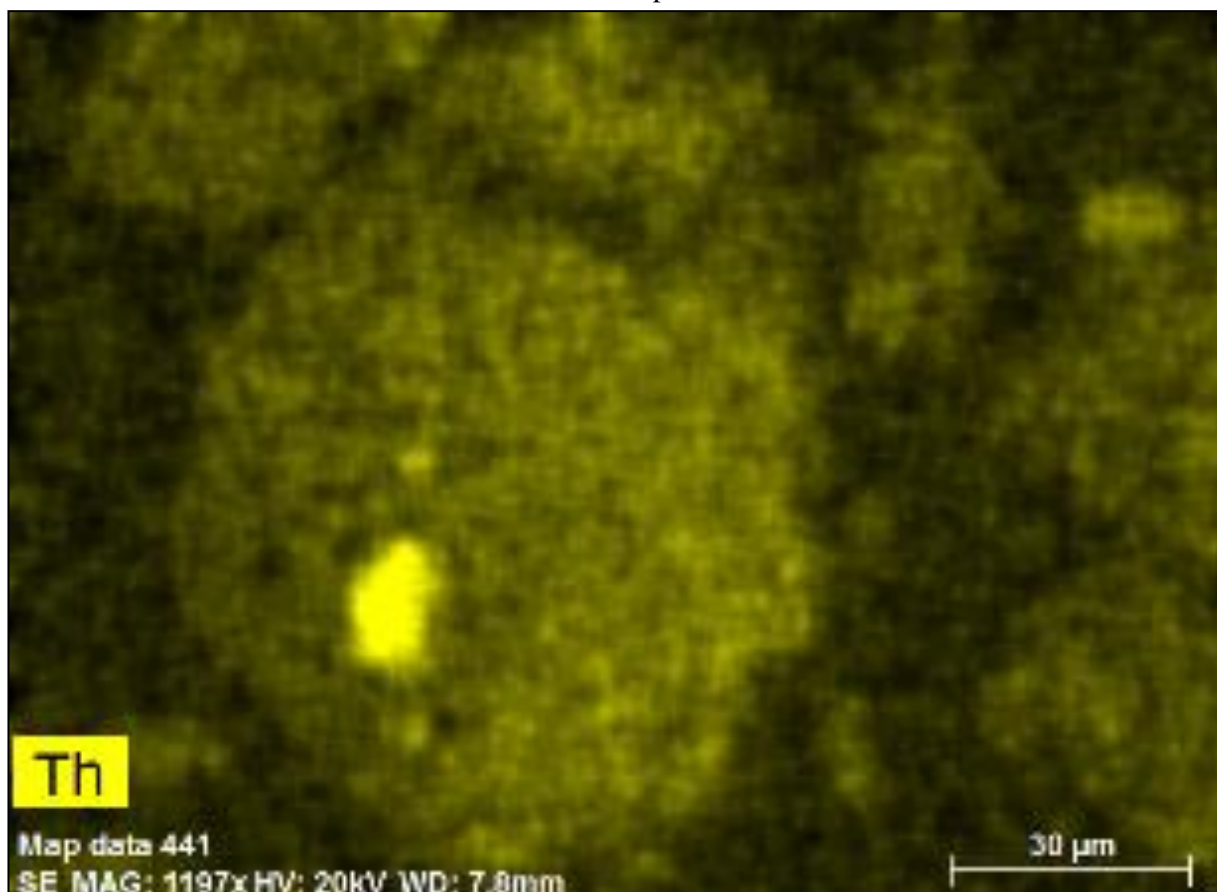
Os minerais residuais predominantes são o K-feldspato, a muscovita, o zircão, os óxidos de Fe, os óxidos de Ti-Nb, os óxidos de Fe e os hidróxidos. Cristais de quartzo são raros.

A composição mineralógica da argila convergiu para os minerais do grupo da Caulinita.

A Gibbsita ocorre em porções irregulares, associadas a aglomerados ou óxidos de argila. Alguns nódulos apresentam porções irregulares de minerais de argila percolando oxihidróxidos de Fe. A Gibbsita sempre ocorre associada a porções argilosas, como cristais isolados ou formando agregados, resultando em uma composição mista, com Si, Al e Fe.

Os minerais de Th identificados ocorrem como inclusões em minerais residuais, litorélicos ou nódulos mais complexos. São predominantemente fosfatos, incluindo Cheralita-Ce (Ce, Ca, Th, P, SiO₄) e Britholita-Ce (Ce, Ca, Th, La, Nd)₅, SiO₄, (PO₄)₃, OH, F, que são associados a fosfatos de Al e Sr, como a Goyazita, Al₂, (PO₄)₂, (OH₅.H₂O), ou outros minerais do grupo da Crandalita (Figura 37).

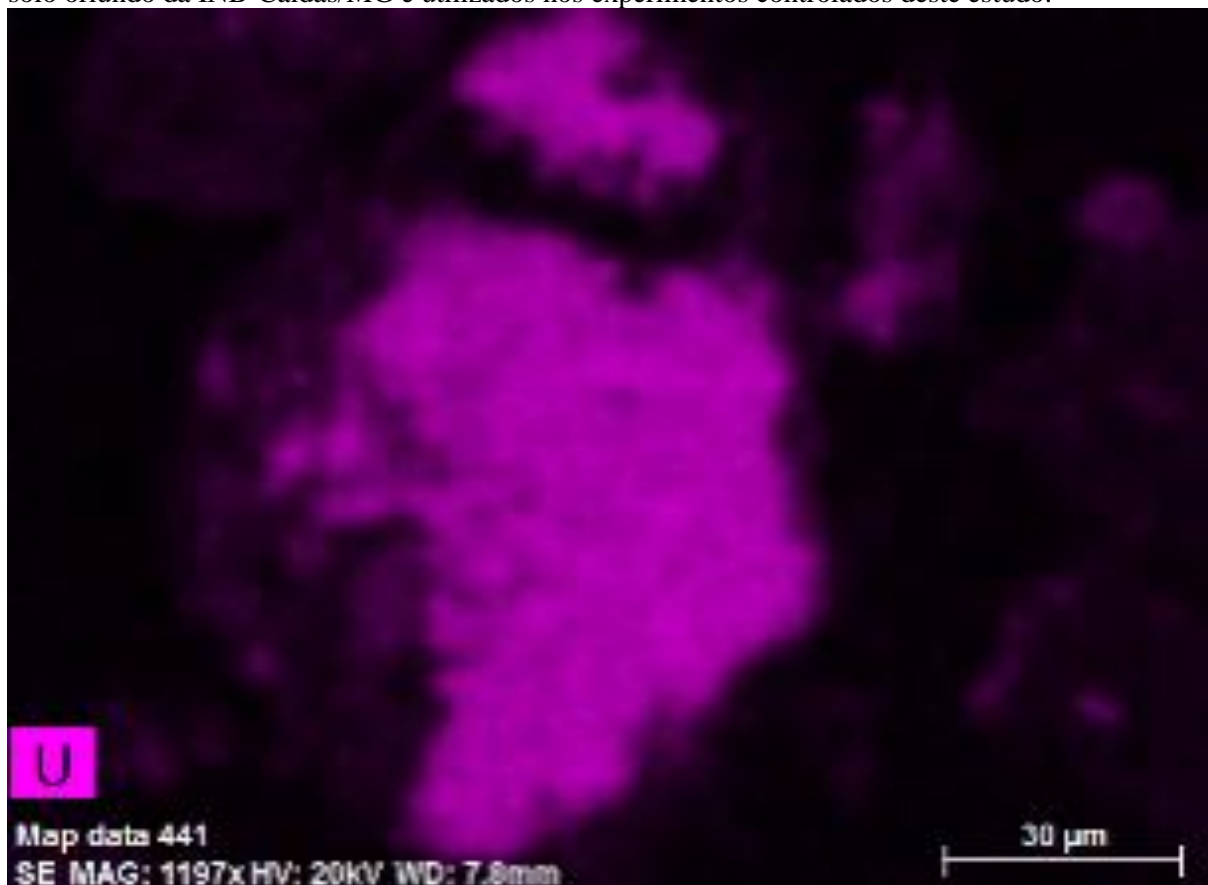
Figura 37: Imagem obtida através do SEM-EDS destacando o mapa para o elemento Th (cor amarela) no solo oriundo da INB-Caldas/MG e utilizados nos experimentos controlados deste estudo.



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV/CDTN.

Os minerais de U nos mapas de elementos em diferentes fragmentos do solo estão sempre associados a minerais contendo K, principalmente muscovita e K-feldspato (Figura 38).

Figura 38: Imagem obtida através do SEM-EDS destacando o mapa para o elemento U (cor lilás) no solo oriundo da INB-Caldas/MG e utilizados nos experimentos controlados deste estudo.



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV/CDTN.

8.3.2 Avaliação físico-química do solo (INB-Caldas)

No solo da INB-Caldas/MG prevaleceram valores para pH ácido (4,6 - 4,8). Esse perfil era esperado muito em função dos resíduos sulfetados que são fonte inesgotável para geração da drenagem ácida local, contendo vários precipitados metálicos, dentre eles os elementos de interesse neste estudo (U e Th), além de metais como zinco, manganês, alumínio, ferro e terras raras (CIPRIANI, 2002).

É importante ressaltar que existe um tratamento paliativo desta água ácida para descarte no meio ambiente que é feito com adição de cal. No entanto, desse tratamento é gerada uma lama, contendo os precipitados metálicos supracitados, que é estocada há mais de 30 anos no entorno da cava da mina, como uma alternativa provisória de disposição de resíduos, formando os bota-foras ou pilhas de rejeito, de onde foi coletado o solo utilizado neste estudo.

8.3.3 Análise da composição elementar do solo (INB-Caldas/MG)

A tabela 2 traz os teores de U e Th encontrados no solo (INB-Caldas/MG) analisado em triplicata por meio da técnica de ativação neutrônica (método k_0). A partir do cálculo da fração mássica absoluta dos elementos de interesse [U] e [Th] foi obtida também a concentração de atividade dos respectivos isótopos ^{232}Th e ^{238}U .

Tabela 2: Teores de U e Th representados pela fração mássica (mg kg^{-1}) e suas respectivas concentrações de atividade (Bq kg^{-1}) do solo (INB-Caldas/MG), em triplicata, obtidos a partir da AAN, método k_0 .

Amostra	U (mg kg^{-1}) [$k = 1$]	Th (mg kg^{-1}) [$k = 1$]	^{238}U (Bq kg^{-1}) [$k = 1$]	^{232}Th (Bq kg^{-1}) [$k = 1$]
(a)	154 ± 6	182 ± 6	1904 ± 70	741 ± 26
(b)	145 ± 5	177 ± 6	1790 ± 63	723 ± 25
(c)	160 ± 6	181 ± 6	1976 ± 72	736 ± 26

O solo analisado mostrou um teor semelhante para a fração mássica do [U] e do [Th] nas três amostras analisadas. No entanto, entre os elementos de interesse, o Th mostrou-se com maior fração mássica na amostra que o U.

O solo utilizado neste experimento, na natureza, é resultado do intemperismo de rochas locais, portanto, oferece como produto a liberação de íons que se difundem em água intersticial do próprio solo. Os minerais primários que resultam diretamente do material originário intemperizado continua a se decompor quimicamente dando origem aos minerais secundários e a formas iônicas que podem ser absorvidas pelas plantas neles hospedadas. Entre os minerais determinados neste solo amostrado em triplicata e apresentados no item 8.3.1. “Avaliação mineralógica do solo (INB-Caldas)”, destacamos aqueles de estágio inicial e de reconhecida importância – sulfatos, carbonatos e silicatos primários (exceto quartzo e muscovita) – para a presença de U e Th naturalmente adsorvidos na fração argilosa deste.

8.4 ETAPA 1 – VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA PELO PMA/CDTN

Os resultados das frações mássicas de U e Th, assim como da concentração de atividade do ^{238}U e ^{232}Th no solo e nas plantas, amostrados nos pontos definidos no PMA/CDTN para verificação da metodologia aplicada neste programa são apresentados. Destacam-se alguns fatores que possivelmente podem afetar a transferência dos elementos de interesse do solo para as plantas e a translocação destes no tecido vegetal. Fatores como o local da coleta, o período

sazonal e suas interações com as variáveis específicas para cada matriz – solo (ex.: profundidade) e planta (ex.: espécie e parte “órgão” da planta) – são discutidos.

8.4.1 Avaliação de U e Th no solo coletado pela metodologia de verificação

8.4.1.1 Solo vs. Ponto de Coleta/Sazonalidade

A Tabela 3 traz os valores das frações mássicas de U e de Th nas amostras coletadas em profundidade nos três pontos de coleta – CPOR, CDTN-1 e CDTN-2. Observa-se que os valores para U nas duas estações, são um pouco maiores à média mundial para solos não contaminados que varia de 0,4 – 6,0 mg kg⁻¹ (SHACKLETTE e BOERNGEN, 1984). Quanto ao Th, as frações mássicas encontradas foram maiores que a média típica (2 – 12 mg kg⁻¹) de solos não contaminados (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2000). Assim, podemos observar que os valores para Th, na estação seca, estão de acordo com os limites encontrados na média mundial. No entanto, na estação chuvosa, apresentando-se com valores bem mais elevados.

Tabela 3: Avaliação da fração mássica (mg kg⁻¹) e da concentração de atividade (Bq kg⁻¹) para U e Th nas amostras de solo coletadas nos pontos de amostragem do PMA/CDTN em duas campanhas sazonais (chuvoso e seco).

Sazonalidade	Ponto	Prof. (cm)	U (mg kg ⁻¹) [k = 1]	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹) [k = 1]	Th (mg kg ⁻¹) [k = 1]	²³² Th (Bq kg ⁻¹) [k = 1]
CHUVOSO (outubro)	CDTN-1	0 – 15	8,1±0,3	100±4	31±1	127±4
		15 – 30	5,0±0,2	62±3	<0,3	<0,4
	CDTN-2	0 – 15	8,0±0,4	99±5	18±1	74±3
		15 – 30	<0,1	<0,1	<0,3	<0,4
	CPOR	0 – 15	6,0±0,2	74±3	25±1	102±4
		15 – 30	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
SECO (maio)	CDTN-1	0 – 15	5,0±0,2	62±3	7,1±0,5	29±2
		15 – 30	<0,1	<0,1	<0,3	<0,4
	CDTN-2	0 – 15	3,1±0,1	38±1	4±1	16±2
		15 – 30	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	CPOR	0 – 15	0,54±0,02	6,7±0,2	5,0±0,4	20±2
		15 – 30	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Apesar dos elementos Th e U apresentarem um comportamento geoquímico semelhante, o Th é naturalmente mais abundante no solo que o U. Por ter uma baixa mobilidade, o Th e seus minerais carreadores são muito estáveis e essa menor mobilidade faz com que este elemento se associe a complexos orgânicos ligantes na solução do solo. É no período chuvoso que esses ligantes orgânicos estão mais presentes se comparado ao período seco onde a solução do solo

está mais permeada de complexos inorgânicos (KABATA-PENDIAS, 2000; De VOS *et al.*, 2006).

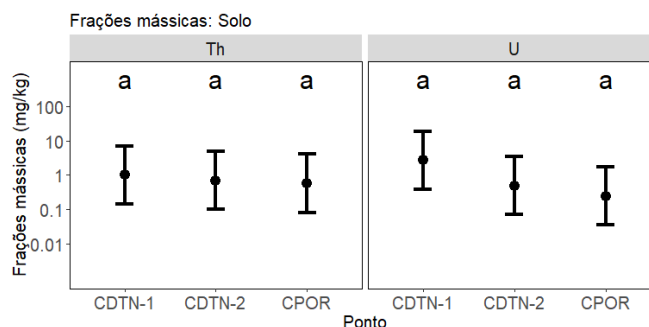
A seguir, a tabela 4 mostra uma avaliação estatística dos resultados obtidos na estação seca e chuvosa com intuito de realizar uma análise descritiva deste fator nos pontos de coleta.

Tabela 4: Avaliação dos valores médios para fração mássica (mg kg^{-1}) de Th e U encontrados no solo dos pontos de amostragem do PMA/CDTN.

Elemento	Ponto	Média	Desvio Padrão
Th	CDTN-1	12,75	16,18
	CDTN-2	7,38	9,39
	CPOR	10,02	13,21
U	CDTN-1	6,03	1,79
	CDTN-2	3,72	4,01
	CPOR	2,20	3,30

Para a fração mássica, em relação ao ponto de coleta, evidencia-se que para os elementos Th e U, as maiores médias aparecem em $\text{CDTN-1} > \text{CPOR} > \text{CDTN-2}$. No entanto, estatisticamente, não foi verificada diferença significativa quanto a variação nos valores médios da fração mássica para U e Th ($p = 0,10$) em relação ao local em que o solo foi coletado (Figura 39), ou seja, há apenas 10% de probabilidade de U e Th apresentarem as medidas frações mássicas diferentes entre os ponto avaliados. A possível falta dessa significância pode ser atribuída ao baixo n amostral.

Figura 39: Representação gráfica do resultado do efeito do “Ponto Amostral” em uma ANOVA 3-Way (Ponto / Profundidade / Período de coleta) na variação da fração mássica do Th e U no solo coletado nos pontos avaliados no PMA/CDTN.



Quanto a individualidade dos elementos de interesse, podemos observar que as médias da fração mássica do Th sobressaem em todos os pontos em relação às do U. Segundo Thiry e colaboradores (2005), o U pode formar compostos complexos e deixar o solo por exemplo, por lixiviação ou por absorção pelas plantas nele hospedadas. Já Katzin e Sonneberg (1986)

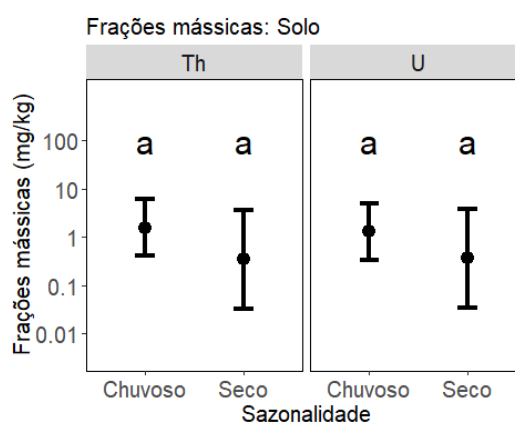
destacam que o Th, muito rapidamente, no solo, pode converter-se para uma forma insolúvel e se ligar fortemente à superfície das partículas argilosas que o compõe.

A tabela 3 apresentou também as frações mássicas no solo em períodos sazonais distintos e mostraram que há uma tendência de os elementos de interesse estarem mais biodisponíveis no período chuvoso. Apesar disso, verificou-se, na figura 40, em relação à sazonalidade, uma falta de significância entre os períodos chuvoso e seco ($p = 0,09$). Mais uma vez, o baixo n amostral pode ser o fator preponderante para que a sazonalidade tenha apenas 9% de probabilidade de influenciar a média da biodisponibilidade e dos valores de fração mássica.

Tabela 5: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados no solo nos pontos de amostragem no PMA/CDTN em períodos sazonais distintos.

Elemento	Sazonalidade	Média	Desvio Padrão
Th	Chuvoso	12,39	14,06
	Seco	5,37	1,58
U	Chuvoso	4,53	3,67
	Seco	2,88	2,24

Figura 40: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U no solo coletado em períodos sazonais distintos no PMA/CDTN.



A fração coloidal do solo (química), em período chuvoso, apresenta grande afinidade pela água e conseqüentemente pelos elementos nela dissolvidos. Contrariamente, no período seco, essa mesma fração coloidal está mais restrita àqueles solos naturalmente umedecidos. Portanto, em meios líquidos, os nutrientes e os metais (incluindo U e Th) já estão presentes numa forma mais biodisponível (VANDENHOVE *et al.*, 2007). Assim, o tipo de solo, da região, pode influenciar na sorção e conseqüentemente na dessorção destes metais. Ramaswami e colaboradores (2001) verificaram nos seus experimentos com dois solos diferentes (arenoso

e rico em matéria orgânica) que a extração de U e Th em solo arenoso (seco) diminui drasticamente.

8.4.1.2 Solo vs. Profundidade

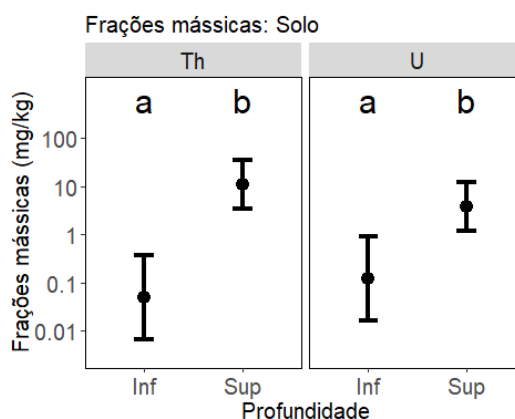
Ainda na tabela 3 podemos verificar que as frações mássicas de U e Th para todos os pontos e em ambos períodos sazonais mostraram-se mais biodisponíveis para a fração de topo (0-15 cm) em relação a fração de fundo (15-30 cm) do solo coletado em profundidade.

Na tabela 6 e figura 41, o fator profundidade mostrou que houve uma significância a ser considerada ($p < 0,001$) tanto para U quanto Th, uma vez que a amostragem de topo (0-15 cm) tem uma fração mássica média maior para Th que para U em relação a amostragem de fundo (15-30 cm).

Tabela 6: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados no solo dos pontos de coleta utilizados no PMA/CDTN em diferentes profundidades.

Elemento	Profundidade	Média	Desvio Padrão
Th	0 – 15 cm	61,33	46,77
	15 – 30 cm	0,15	0,09
U	0 – 15 cm	63,28	36,28
	15 – 30 cm	20,70	35,77

Figura 41: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U no solo coletado em profundidades diferentes no PMA/CDTN.



A sugestão de coletar o solo em profundidade vem de estudos da EPA. Estes destacam que em condições tropicais, os elementos tendem a se acumular nas camadas mais profundas do solo. Os resultados apresentados nesta pesquisa são corroborados por alguns destes estudos cujos resultados apontam que a disponibilidade desses elementos no solo se encontra nos primeiros 20 cm de profundidade (USEPA, 2012). No entanto, Sheppard e Evenden (1992) destacam que não se pode generalizar essa situação para todos os casos, pois, existem,

naturalmente, diferenças na biodisponibilidade de radionuclídeos nos solos que podem ser baseados, estritamente, nas propriedades físicas e químicas destes que podem não ter qualquer relação com a variância da profundidade.

8.4.2 Avaliação de U e Th nas plantas em estudo para biomonitoramento

8.4.2.1 Avaliação das plantas nos diferentes pontos de coleta e sazonalidades

A Tabela 7 traz os valores das frações mássicas de U e de Th nas amostras de plantas coletadas inteiras (completas) nos três pontos de coleta – CPOR, CDTN-1 e CDTN-2. Observa-se que, de um modo geral, para os elementos U e Th, as maiores frações mássicas em ambos períodos sazonais para as plantas foram CPOR > CDTN-1 > CDTN-2.

Tabela 7: Avaliação das frações mássicas e das concentrações de atividades de U e Th nas amostras de plantas coletadas nos pontos de coleta do PMA/CDTN em duas campanhas de amostragem.

Período	Ponto	Espécie	Órgão	U (mg kg ⁻¹) [k = 1]	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹) [k = 1]	[Th] (mg kg ⁻¹) [k = 1]	²³² Th (Bq kg ⁻¹) [k = 1]
CHUVOSO (outubro)	CPOR	<i>Brach.</i>	PA	<0,03	<0,04	0,21±0,01	0,86±0,04
			R	0,21±0,03	2,6±0,4	1,1±0,04	4,5±0,2
	CDTN 1	<i>E. pin.</i>	PA	0,15±0,04	1,9±0,1	0,08±0,04	0,32±0,01
			R	0,2±0,1	3±1	0,20±0,01	0,80±0,04
	CDTN 2	<i>Cyn.</i>	PA	<0,04	<0,05	<0,04	<0,05
			R	0,050±0,005	0,62±0,06	0,063±0,005	0,26±0,02
SECO (maio)	CPOR	<i>Brach.</i>	PA	<0,1	<0,1	0,62±0,02	2,5±0,1
			R	0,5±0,4	6±5	15,84±0,55	64,4±2,2
	CDTN 1	<i>E. pin.</i>	PA	<0,1	<0,1	4,2±0,2	17±1
			R	5,0±0,2	62±3	18±1	74±3
	CDTN 2	<i>Cyn.</i>	PA	0,5±0,1	7±1	2,00±0,05	8,2±0,2
			R	0,5±0,1	7±1	3,1±0,1	13,0±0,3

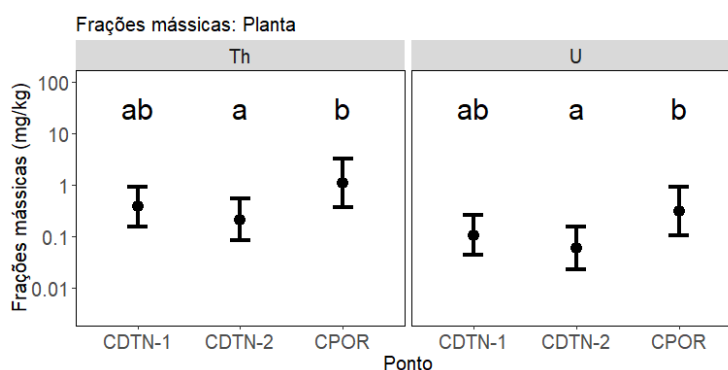
Brach. (*Brachiaria*); *E. pin.* (*Epipremnum pinnatum*); *Cyn.* (*Cynodom*); PA (Parte Aérea); R (Raiz).

Na figura 42, para fração mássica por ponto de coleta, foi verificada uma diferença significativa entre dois pontos (CDTN-2 e CPOR) para ambos elementos U e Th ($p = 0,007$), sendo que o ponto CPOR apresentou uma média maior que CDTN-2. Neste caso, a diferença de espécies amostradas nos pontos de coleta produziu um ruído muito grande nos resultados. A falta de uma espécie vegetal comum aos pontos de coleta impede a verificação de uma diferença fidedigna entre eles, podendo inclusive induzir os resultados a dois possíveis erros estatísticos: a) apontar significância entre dois pontos iguais (erro tipo 1); b) apontar falta de significância entre pontos diferentes (erro tipo 2).

Tabela 8: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados nas plantas coletadas nos pontos de amostragem no PMA/CDTN.

Elemento	Ponto	Média	Desvio Padrão
Th	CDTN-1	2,87	5,96
	CDTN-2	0,68	0,70
	CPOR	5,88	8,26
U	CDTN-1	0,19	0,15
	CDTN-2	0,13	0,13
	CPOR	1,32	2,46

Figura 42: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U nas plantas coletadas nos pontos avaliados no PMA/CDTN.



Existem vários estudos demonstrando que plantas hospedadas em solos fosfatados, carbonatados ou sulfatados têm maior propensão a absorver U e Th, por estes estarem mais biodisponíveis nestes tipos de solos. No entanto, este não deve ser o único fator a ser considerado aqui, pois deve-se levar em consideração as espécies utilizadas e os aspectos físico-químicos do próprio solo. Assim como verificado neste estudo, na literatura, as concentrações de U e Th nas plantas são geralmente de várias ordens de magnitude mais baixas do que no solo que as hospeda.

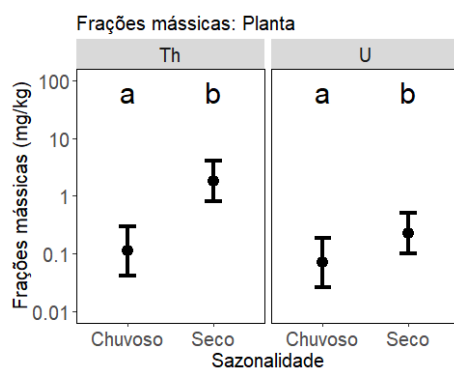
A tabela 9 mostra, também, que as frações mássicas obtidas, nos pontos de coleta, em períodos sazonais distintos seguiram um padrão oposto ao do solo, no qual as plantas mostraram ter maior capacidade de translocação e acúmulo dos elementos de interesse em seus tecidos na estação seca. A concentração de um dado elemento no tecido vegetal pode sofrer variação em determinados períodos, como por exemplo durante o crescimento vegetativo. Portanto, a variação da fração mássica de um dado elemento nas plantas pode variar dentro de uma estação em função da luminosidade que é mais intensa, por exemplo, no período de seca ou por desidratação (MYUNG e THORNTON, 1997; OTERO e MACIAS, 2002).

Neste cenário, o Th e o U (Figura 43) também apresentaram uma diferença significativa para este período ($p < 0,001$).

Tabela 9: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados nas plantas coletadas nos pontos de amostragem utilizados no PMA/CDTN em relação ao período sazonal.

Elemento	Sazonalidade	Média	Desvio Padrão
Th	Chuvoso	0,24	0,39
	Seco	4,38	6,52
U	Chuvoso	0,09	0,08
	Seco	0,67	1,53

Figura 43: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U nas plantas coletadas nos pontos avaliados no PMA/CDTN em relação ao período sazonal.



8.4.2.2 Avaliação comparativa entre plantas de diferentes espécies

Na tabela 7 podemos verificar que dentre as espécies apresentadas neste estudo seja para avaliação das plantas já utilizadas no PMA/CDTN (*Cynodon* e *Brachiaria*) como da planta escolhida como candidata natural a biomonitor (*Epipremnum pinnatum*) para a presença de U e Th, a *E. pinnatum*, mostrou-se com as maiores frações mássicas. No entanto, os valores relatados para as frações mássicas de U e Th em espécies diferentes ou de mesma espécie podem diferir significativamente (MARKERT, 1993). Desta forma é possível supor que a diferença natural na capacidade das plantas de absorver radionuclídeos pode não ser a única razão para tal situação. Ishtangeeva (2005) destaca que outros fatores podem contribuir para essas diferenças nos resultados de muitos estudos. Um exemplo são as diferenças metodológicas de amostragem das plantas e preparação da matéria vegetal para análise elementar, assim como a sensibilidade e precisão da técnica analítica utilizada para determinação das frações mássicas, muitas vezes baixas do U e Th, em relação a outros elementos, no tecido vegetal.

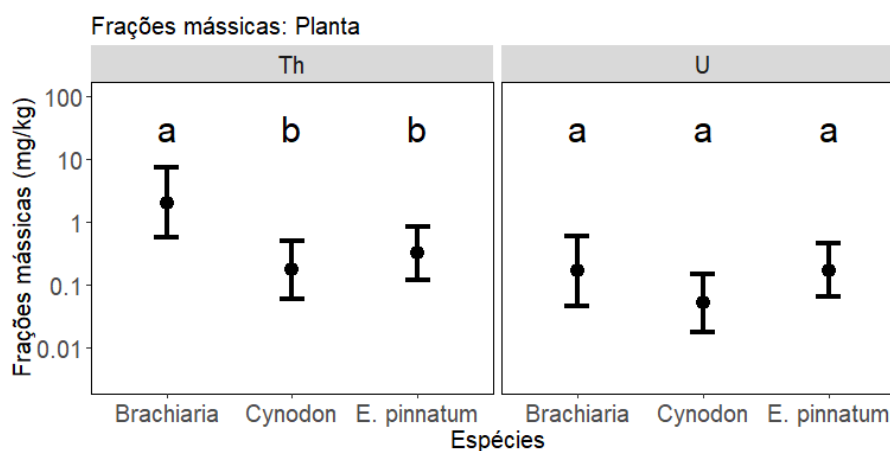
Podemos verificar que, dentre as espécies utilizadas nesse estudo, a diferença com maior significância é da *Brachiaria*, principalmente em relação ao elemento Th, apresentando uma

média da fração mássica maior que as outras duas espécies. Esta situação nos remete ao fato de haver distintas espécies nos pontos de coleta (Tabela 10; Figura 44). Este cenário só nos permite verificar a capacidade de absorção das espécies, no entanto, não nos é possível determinar entre as espécies aquela com melhor desempenho no ambiente natural. Por este motivo, o estudo controlado, submetendo as espécies as mesmas condições, torna-se fundamental para verificação das capacidades de absorção, translocação e acúmulo dos elementos de interesse.

Tabela 10: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados nas plantas em relação às espécies utilizadas no PMA/CDTN.

Elemento	Sp.	Média	Desvio Padrão
Th	<i>Brachiaria</i>	5,88	8,26
	<i>E. pinnatum</i>	2,77	6,00
	<i>Cynodon</i>	0,77	0,72
U	<i>Brachiaria</i>	0,19	0,09
	<i>E. pinnatum</i>	1,32	2,46
	<i>Cynodon</i>	0,12	0,19

Figura 44: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U nas plantas em relação às espécies utilizadas no PMA/CDTN.



Em relação a concentração da atividade, a *Brachiaria* teve uma média significativamente maior que a *Cynodon* em relação ao ^{238}Th ($p = 0,016$). Já a *E. pinnatum* apresentou uma média significativa maior que a *Cynodon*, sobretudo para a atividade do ^{238}U (valor $p = 0,004$). O n amostral das espécies é muito baixo para evidenciar possíveis diferenças entre outras espécies.

8.4.2.3 Avaliação comparativa de plantas em relação às suas respectivas estruturas

Ainda na tabela 7 podemos observar como os elementos translocaram e acumularam nas diferentes estruturas das plantas (raiz e parte aérea). Verificou-se que os elementos de interesse se acumularam preferencialmente nas raízes, apresentando uma baixa taxa de translocação para

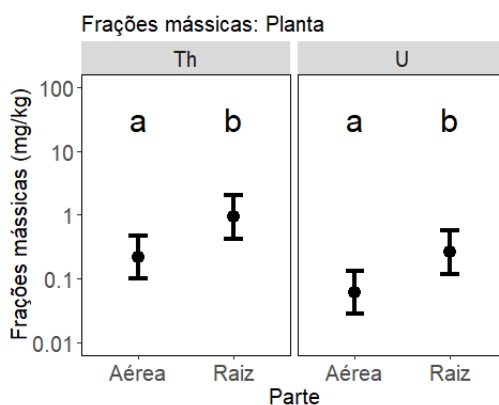
a parte aérea (caule e folhas) das plantas. Em muitas publicações há relatos de fração mássica de U e Th mais altas nas raízes em relação a parte aérea, corroborando com os resultados alcançados neste estudo (SHTANGEEVA e AYRAULT, 2004; CHANG *et al.*, 2005). No gráfico 45 evidencia-se que entre as plantas coletadas foi verificada uma diferença significativa entre a parte aérea e a raiz em relação a fração mássica de ambos os elementos U e Th ($p = 0,006$), com valores médios mais elevados para raiz em relação a parte aérea (Figura 47).

Vale ressaltar que muitos resultados em estudos semelhantes podem diferir em função da metodologia no preparo da matéria vegetal, cuja lavagem cuidadosa tanto das raízes quanto das folhas podem não remover para frações mínimas as partículas de solo nelas aderidas interferindo substancialmente na fração mássica real.

Tabela 11: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados nas plantas utilizados no PMA/CDTN em relação à bioacumulação em diferentes partes da planta.

Elemento	Parte	Média	Desvio Padrão
Th	Aérea	0,80	1,34
	Raiz	4,79	7,30
U	Aérea	0,09	0,10
	Raiz	0,81	1,70

Figura 45: Representação gráfica do efeito da parte da planta na variação da fração mássica do Th e U encontrados nas plantas utilizados no PMA/CDTN.



8.4.3 Fator de Transferência ($FT_{S/P}$)

Os valores médios para transferência de Th e U do solo para as espécies usadas neste estudo mostraram para *Brachiaria* ($FT_{Th} = 0,59$; $FT_U = 0,60$); *E. pinnatum* ($FT_{Th} = 0,60$; $FT_U = 0,05$); e *Cynodon* ($FT_{Th} = 0,16$; $FT_U = 0,08$). Uma das premissas nas avaliações radioecológicas é a suposição de que a transferência de radionuclídeos do solo para a planta é uma relação linear positiva (BERESFORD e WRIGHT, 2005). No entanto, há estudos

mostrando que essa transferência dos radionuclídeos não é frequentemente tão linear e positiva (DIEBOLD e McGRATH, 1985; SHEPPARD e EVENDEN, 1988; SHEPPARD *et al.*, 1989).

8.4.4 Avaliação comparativa das diferentes espécies do PMA/CDTN

Ao término dessa etapa, pode-se verificar que as espécies utilizadas neste estudo apresentam, em sua maioria, as características desejadas para uma boa avaliação da condição radiossanitária da instalação (CDTN) através de seu PMA. Destaque para a *E. pinnatum* (Quadro 11).

Quadro 11: Matriz comparativa das características desejadas para as espécies utilizadas no PMA/CDTN.

MATRIZ COMPARATIVA			
<i>Características desejáveis para um biomonitor</i>	<i>Brachiaria</i>	<i>Cynodon</i>	<i>E. pinnatum</i>
▪ Fácil reconhecimento no campo	✓	✓	✓
▪ Ampla distribuição geográfica	✗	✗	✓
▪ Fácil coleta	✓	✓	✓
▪ Porte mediano	✓	✓	✓
▪ Ciclo de vida longo (perene)	✗	✗	✓
▪ Capacidade de absorção e translocação	✓	✓	✓

✓ Possui a característica desejada.

✗ Não possui a característica desejada.

8.5 ETAPA 2 – VERIFICAÇÃO, EM AMBIENTE CONTROLADO, DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO, TRANSLOCAÇÃO E ACUMULAÇÃO DE Th E U PELAS PLANTAS UTILIZADAS NO PMA/CDTN

Nesta etapa, são apresentados os resultados da capacidade de absorção, translocação e acumulação de Th e U pelas espécies utilizadas no PMA/CDTN, cultivadas na solução nutritiva (Ensaio I) e no solo (Ensaio II) em condições controladas.

8.5.1 Ensaio I – Cultivo em solução nutritiva

As gramíneas, *Urochloa brizantha* e *Cynodon dactylon*, não resistiram ao experimento com a solução nutritiva. No 20º dia do cultivo, foi verificada a falta de resposta por parte das mudas que se encontravam com uma coloração amarelo-amarronzada, caracterizando a morte do tecido vegetal.

As plantas respondem diretamente a mudanças no ambiente e essas alteram sua fisiologia e/ou morfologia, a fim de melhorar sua sobrevivência. A estas alterações chamamos de adaptação ou aclimação. Em estudos envolvendo crescimento de plantas em solução nutritiva, apesar de ser um processo simples para algumas espécies, outras podem vir a

sucumbir por um transtorno fisiológico e bioquímico causados pelo fator ambiental denominado “inundação” que pode entre outras coisas provocar hipoxia e anoxia – ausência parcial ou completa de O₂ nos tecidos vegetais (TAIZ *et al.*, 2017).

Reconhecidamente a presença de O₂ em água é expressivamente mais baixa que no ar e mesmo utilizando de oxigenação forçada no experimento, este não foi o suficiente para que as gramíneas sobrevivessem o tempo necessário para reprodutibilidade e linearidade dos testes. Neste caso, a respiração nas raízes das gramíneas foi suprimida e a fermentação aumentada promovendo o esgotamento energético das mudas e acidificação da solução. Conforme Taiz e colaboradores (2017), esse tipo de estresse anaeróbico pode causar a morte celular em horas e até dias, dependendo do grau de adaptação genética da espécie.

8.5.2 Ensaio II – Cultivo em solo

Na tabela 12 são apresentadas as frações mássicas de U e Th para as plantas utilizadas no PMA/CDTN submetidas a um ensaio com cultivo em solo com alto teor natural dos elementos de interesse.

Tabela 12: Teor de Th e U (mg kg⁻¹) e concentração de atividade (Bq kg⁻¹) encontrado nas plantas usadas no experimento de avaliação da espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN.

Maio de 2018		U (mg kg ⁻¹) [k = 1]	Th (mg kg ⁻¹) [k = 1]	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹) [k = 1]	²³² Th (Bq kg ⁻¹) [k = 1]
<i>Brachiaria</i>	PA	1,66±0,01	1,71±0,01	20,5±0,1	6,97±0,04
	R	2,4±0,2	7,3±0,2	29±2	30±1
<i>Cynodon</i>	PA	0,230±0,004	0,470±0,001	2,84±0,05	1,910±0,004
	R	1,490±0,001	4,24±0,01	18,41±0,01	17,27±0,04
Outubro de 2017		U (mg kg ⁻¹) [k = 1]	Th (mg kg ⁻¹) [k = 1]	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹) [k = 1]	²³² Th (Bq kg ⁻¹) [k = 1]
<i>Brachiaria</i>	PA	0,66±0,02	0,62±0,01	8,1±0,2	2,53±0,04
	R	4,16±0,06	7,2±0,2	51,4±0,7	29,3±0,8
<i>Cynodon</i>	PA	1,7±0,1	1,6±0,1	35±1	6,4±0,4
	R	7,8±0,2	7,2±0,2	96±3	29,3±0,8

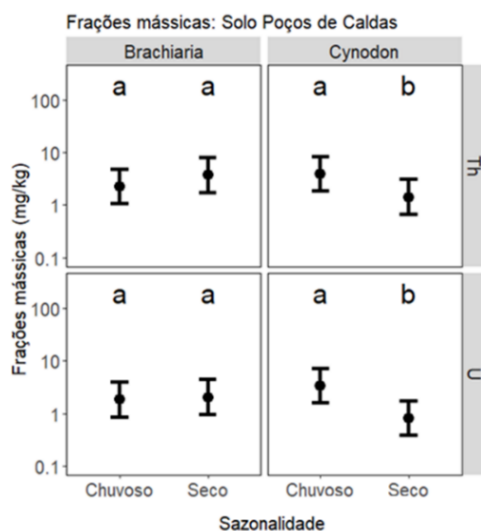
PA = Parte Aérea; R = Raiz.

Observa-se que as maiores frações para U e Th foram para *Brachiaria* em relação a *Cynodon*. Este perfil chamou atenção, pois no ambiente natural esse mesmo padrão foi verificado o que nos sugere que a *Brachiaria* é uma espécie com uma capacidade a ser considerada no que se refere a absorção e acumulação de elementos em seus tecidos.

A figura 46 mostra que em ambas as plantas houve um acúmulo significativo, sobretudo, para a raiz que apresentou maiores valores que a parte aérea ($p < 0,001$). Se compararmos a absorção de Th e U, neste experimento, pelas raízes das plantas, podemos verificar que o Th foi mais absorvido em relação ao U. Tradicionalmente, as raízes funcionam como barreiras naturais para absorção de nutrientes, incluindo radionuclídeos, pelas plantas. Além disso, a translocação das raízes para a parte aérea vai depender da espécie (GRENGER, 1999).

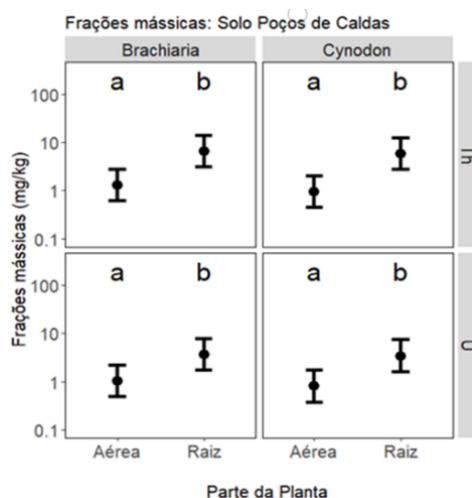
Shahandeh e Hossner (2002) apresentaram em seu trabalho que frações mássicas para U em raízes de plantas diferentes coletadas em um mesmo local são 30 a 50 vezes maior que a fração mássica para U na parte aérea. Já a translocação do tório é limitada nas plantas, permanecendo as maiores concentrações nas raízes como apresentado nos estudos de Shtangeeva (2010); Chen e colaboradores (2005) para diferentes tipos de culturas.

Figura 46: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados em ambas as partes das plantas utilizadas no PMA/CDTN em relação ao solo (INB-Caldas).



Na figura 47, a variação da fração mássica em relação ao efeito da sazonalidade só foi significativa para a espécie *Cynodon*, sendo que o período seco teve média menor que o chuvoso ($p = 0,002$ para Th e $p = 0,004$ para U). A *Cynodon* apresentou menores valores, sobretudo para raiz em relação a ambos elementos ($p = 0,03$ para Th e $p = 0,007$ para U) e para parte aérea apenas para o elemento U ($p = 0,031$).

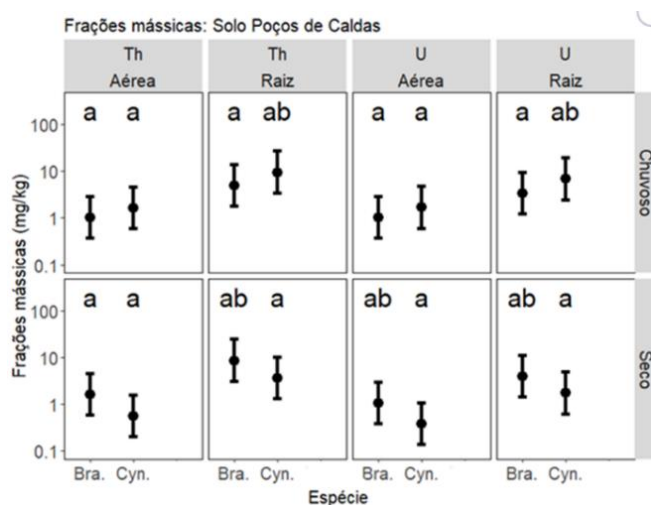
Figura 47: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados nas plantas utilizadas no PMA/CDTN em relação ao solo (INB-Caldas) em períodos sazonais distintos.



A capacidade de absorção das plantas no solo varia de acordo com o ambiente e seu estágio de desenvolvimento vegetal e, como descrito anteriormente, pela biodisponibilidade dos elementos. Dentre alguns dos principais fatores que possivelmente influenciaram a absorção dos elementos de interesse neste estudo, realizado em um ambiente parcialmente controlado, destacam-se fatores associados à sazonalidade, como a temperatura, a umidade e a aeração. A realização do ensaio em dois períodos distintos mostrou resultados interessantes, pois as maiores médias obtidas no período chuvoso, época de temperaturas elevadas, implica dizer que há um aumento da permeabilidade, por parte do solo, e conseqüentemente de maior fluxo de solução neste contendo os elementos de interesse. Já as plantas, submetidas a altas temperaturas, absorveram mais essa solução contendo nutrientes e outros elementos não essenciais como o U e Th, pois estas aumentam sua taxa respiratória, ou seja, perdem mais água para o meio em função da transpiração. Experimentalmente, em baixas temperaturas, tanto a absorção de íons quanto a taxa de respiração da planta decaem rapidamente, principalmente em plantas sensíveis ao resfriamento, como é o caso das gramíneas (KERBAUY, 2008).

Na figura 48 a variação das frações mássicas em relação as espécies, *Brachiaria* e *Cynodon* apresentou maiores médias para ambos os elementos no período seco ($p = 0,045$ para Th e $p = 0,010$ para U).

Figura 48: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados nas plantas utilizadas no PMA/CDTN em relação ao solo (INB-Caldas) em relação à espécie.



8.6 ETAPA 3 – ESTABELECIMENTO DE ESPÉCIE BIOMONITORA COMO COMPLEMENTO A METODOLOGIA DO PMA/CDTN

Na tabela 13 são apresentadas, inicialmente, as diferenças das frações mássicas e as consequentes concentração da atividade, frente as respectivas doses (padrões) adicionadas nos vasos que compõem a mesa hidropônica:

- Padrão de Urânio: 2.234 mg L⁻¹ em 2,5 L de solução nutritiva.
- Padrão de Tório: 2.016 mg L⁻¹ em 2,5 L de solução nutritiva.

Na mesa hidropônica, os vasos foram organizados em grupos:

- Controle = corresponde ao branco da amostra no experimento (sem adição de padrões);
- Tratamento 1 = corresponde ao grupo no qual foi adicionado apenas o padrão de urânio (U) a uma dose de 2.234 mg L⁻¹ em casa vaso.
- Tratamento 2 = corresponde ao grupo no qual foi adicionado apenas o padrão de tório (Th) a uma dose de 2.016 mg L⁻¹ em cada vaso.

A *Epipremnum pinnatum*, na matriz comparativa, dentre as espécies utilizadas neste estudo (item 8.4.3. Fator de Transferência), apresentou as principais características desejáveis para um biomonitor. A dose máxima foi usada com objetivo de se avaliar a resiliência da espécie frente aos testes, sendo esta uma das características importantes para um biomonitor, “ser capaz de resistir a experimentos controlados”.

Tabela 13: Avaliação das frações mássicas (mg kg^{-1}) e concentração de atividade (Bq kg^{-1}) para padrões de U e Th no estabelecimento de espécie biomonitora como complementação a metodologia do PMA/CDTN.

Dose mg L^{-1}	Tratamento	Órgão	U (mg kg^{-1}) [$k = 1$]	^{238}U (Bq kg^{-1}) [$k = 1$]	Th (mg kg^{-1}) [$k = 1$]	^{232}Th (Bq kg^{-1}) [$k = 1$]
-	C	PA	<0,4	-	<0,7	-
		R	<0,3	-	<0,6	-
		PA	<0,4	-	<0,7	-
		R	<0,3	-	<0,6	-
		PA	<0,4	-	<0,7	-
		R	<0,3	-	<0,6	-
2.234	U	PA	4±1	5,0±2,5	-	-
		R	544±6	6720±74	-	-
		PA	3,0±0,1	37±1	-	-
		R	563±4	6950±49	-	-
		PA	9±1	111±12	-	-
		R	596±3	7360±37	-	-
2.016	Th	PA	-	-	4,0±0,1	16,3±0,4
		R	-	-	131±5	534±20
		PA	-	-	4,0±0,1	16,3±0,4
		R	-	-	157±6	639±24
		PA	-	-	11,0±0,4	44,8±0,2
		R	-	-	199±7	811±29

C = Controle; U = Tratamento 1 (urânio); Th = Tratamento 2 (tório); PA = Parte Aérea; R = Raiz.

Observa-se que os grupos se comportaram como esperado, onde os padrões apareceram apenas onde foram aplicados, respectivamente.

8.6.1 Tratamento Controle (Branco)

O controle composto de plantas desenvolvidas em solução nutritiva sem a presença dos padrões U e Th teve atestada a ausência de ambos os elementos de interesse na matéria vegetal (plantas de 2ª geração). Todas as amostras apresentaram valores menores do que o limite de detecção (LD).

8.6.2 Tratamento com Urânio

As plantas submetidas ao tratamento 1 (U) mostraram uma grande absorção do elemento de interesse, biodisponível, com uma fração mássica variando de 548 a 605 mg kg^{-1} . Portanto, a *Epipremnum pinnatum* mostrou uma elevada capacidade de absorção com acúmulo nas raízes alto e uma baixa capacidade de translocação para parte aérea.

8.6.3 Tratamento com Tório

As plantas submetidas ao tratamento 2 (Th) mostraram boa capacidade de absorção do elemento. A *Epipremnum pinnatum* mostrou uma capacidade de absorção e acúmulo menor em relação às tratadas apenas com U. No entanto, a capacidade de concentrar, em maior quantidade, o elemento de interesse nas raízes foi igual.

Alguns autores ratificam que há diferenças nas medições dos mecanismos de absorção dos elementos no solo e em solução nutritiva pelas plantas, uma vez que no solo nem sempre os elementos encontram-se biodisponíveis, contrariamente ao que ocorre na solução nutritiva (SHTANGEEVA, 2006). No entanto, é preciso realçar que este experimento não teve como objetivo a comparação com os dados obtidos no campo, mas apenas avaliar a capacidade de absorção dos elementos de interesse por uma espécie candidata a biomonitor da presença de U e Th no ambiente que as hospeda.

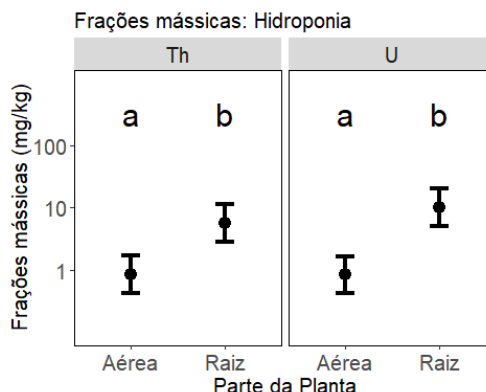
A tabela 14 mostra que as diferenças entre os tratamentos seguiram o padrão esperado, ou seja, maiores concentrações de Th nos tratamentos onde ele foi adicionado e maiores concentrações de U nos tratamentos onde ele foi adicionado. A raiz apresentou uma fração mássica significativamente maior ($p < 0,001$) que a parte aérea para ambos os elementos (Figura 49).

Tabela 14: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg^{-1}) para Th e U encontrados na espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN.

Parte	Elemento	Tratamento	Média	Desvio Padrão
PA	Th	C	<0,35	0,00
R			<0,30	0,00
PA	U		<0,20	0,00
R			<0,15	0,00
PA	Th	Th	6,33	4,04
R			162	34,3
PA	U	U	-	-
R			-	-
PA	Th	U	-	-
R			-	-
PA	U		5,33	3,21
R			568	26,3

C = Controle; U = Tratamento 1 (urânio); Th = Tratamento 2 (tório); PA = Parte Aérea; R = Raiz.

Figura 49: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados nas diferentes partes da espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN.



Este padrão evidenciado pelo experimento mostra que em geral, independente do substrato, a maioria das plantas tendem acumular elementos mais nas raízes que na parte aérea.

8.6.4 Absorção e distribuição de U + Th na espécie candidata a biomonitor cultivada em hidroponia

A análise do comportamento dos elementos U e Th quando introduzidos juntos em um mesmo tratamento e da capacidade de absorção de ambos simultaneamente pela espécie candidata a biomonitor foi realizada através do Tratamento 3 (U + Th).

Para fins de comparação na capacidade de absorção, translocação e acúmulo dos elementos de interesse, foram aplicadas três doses distintas de ambos os padrões:

- Dose Mínima: U = 558,5 + Th = 504 mg kg⁻¹
- Dose Média: U = 1.117 + Th = 1.008 mg kg⁻¹
- Dose Máxima: U = 2.234 + Th = 2016 mg kg⁻¹

A tabela 15 traz os valores obtidos das frações mássicas e suas respectivas atividades por dose (500, 1.000 e 2.000 mg kg⁻¹) para cada parte da planta (raiz e parte aérea).

Os resultados apresentados mostram que as doses dos padrões utilizados influenciaram na absorção dos elementos de interesse pelas plantas, onde a dose máxima mostrou uma diferença, de absorção, proporcionalmente maior em relação a dose média, que por sua vez, mostrou uma diferença de absorção muito próxima da dose mínima, sobretudo, nas raízes. Esta diferença pode ter sido causada em função da partição das diferentes doses em um mesmo volume de solução líquida (2,5 L). A incorporação desses padrões na solução nutritiva os coloca em estado de competitividade com os macronutrientes e micronutrientes que a compõe. Assim, quando adicionados em doses menores, os elementos de interesse, mais diluídos, podem sofrer

uma maior partição do que quando estes são adicionados em uma dose muito alta. Neste último caso, a partição dos nutrientes e elementos de interesse (U e Th) na solução tem uma influência muito menor que no caso anterior.

Tabela 15: Frações mássicas e concentrações de atividade do U e Th na espécie candidata a biomonitor (*Epipremnum pinatum*).

Dose	Órgão	U (mg kg ⁻¹) [k = 1]	Th (mg kg ⁻¹) [k = 1]	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹) [k = 1]	²³² Th (Bq kg ⁻¹) [k = 1]
2000	PA	20,4±0,1	20,1±0,1	247±1	81,5±0,4
	R	555±11	115±4	6856±136	468±16
	PA	55,1±0,2	50,3±0,2	679±2	204±1
	R	1369±55	292±12	16911±679	1189±49
	PA	49,2±0,2	19,6±0,1	605±3	77,4±0,4
	R	442±10	134±9	5460±124	546±37
1000	PA	53±1	32±4	659±15	131±18
	R	91±30	47±1	1130±372	191±3
	PA	10,7±0,4	34,6±0,2	132±5	141±1
	R	17±10	92±1	206±125	373±3
	PA	24,2±0,2	11,9±0,1	299±3	48,4±0,3
	R	38,2±0,4	84,6±0,2	4723±5	344±1
500	PA	19,10±0,03	12,4±0,1	236±1	50,5±0,5
	R	27,3±0,3	70,9±0,4	337±3	289±1
	PA	11,5±0,01	25,1±0,2	142±1	102±1
	R	18,6±0,1	31±8	230±1	126±14
	PA	12,29±0,02	13,4±0,1	151,9±0,2	546±0,3
	R	20,7±0,2	25,1±0,2	256±3	102±4

PA = Parte Aérea; R = Raiz.

Percebe-se, diante dos resultados obtidos, que a literatura especializada faz generalizações não apropriadas sobre absorção, translocação e acúmulo de radionuclídeos, dentre os quais o U e o Th. Não apropriadas, pois tentam enquadrar o comportamento químico dos elementos como regra geral, imutável, para todas as espécies vegetais. As contradições entre autores podem ser atribuídas a essas generalizações. Assim, parece ser fundamental particularizar esse tipo de pesquisa para o maior número possível de espécies, comparando, quando possível, os efeitos em solução nutritiva e em solos. De acordo com Arduini *et al.* (1996), a regulação de absorção pela rizosfera, o acúmulo nas raízes, de forma a preservar a integridade e as funções primárias e o baixo transporte para a parte aérea são considerados os

possíveis mecanismos pelos quais o sistema radicular pode contribuir para uma tolerância a estes elementos. Como esperado, os valores médios das frações mássicas acompanharam o decréscimo nas doses aplicadas – 2000 > 1000 > 500 (Tabela 16). Observou-se (Figura 50) que a fração mássica do U foi significativamente maior que a do Th ($p = 0,03$), apenas para a dose máxima – 2000 mg kg⁻¹.

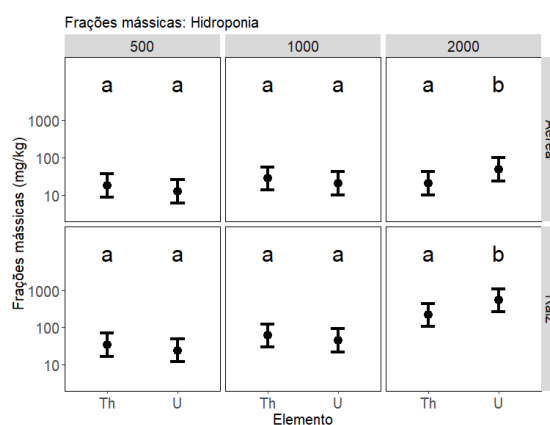
Já para concentração de atividade o ²³⁸U apresentou um valor médio significativamente maior que ²³²Th nas doses média – 1.000 mg kg⁻¹ ($p = 0,04$) e máxima – 2.000 mg kg⁻¹ ($p < 0,001$) para ambas as partes da planta (raiz e parte aérea).

Tabela 16: Avaliação dos valores médios da fração mássica (mg kg⁻¹) para Th e U encontrados na espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN em relação às doses aplicadas 500, 1000 e 2000 mg kg⁻¹.

Parte	Elemento	Dose	Média	Desvio Padrão	
PA	Th	500	16,9	7,06	
R			42,3	24,9	
PA	U		14,3	4,18	
R			22,2	4,55	
PA	Th		1000	26,2	12,5
R				74,3	24,1
PA	U	29,4		21,8	
R		48,8		38,5	
PA	Th	2000		29,7	17,6
R				180	97,2
PA	U		41,3	18,7	
R			789	505	

U = Tratamento 1 (urânio); Th = Tratamento 2 (tório); PA = Parte Aérea; R = Raiz.

Figura 50: Representação gráfica da significância na variação da fração mássica do Th e U encontrados na espécie candidata a biomonitor como complemento para o PMA/CDTN em relação às doses aplicadas 500, 1000 e 2000 mg kg⁻¹.



Avaliando a bioacumulação da concentração de atividade para ^{238}U e ^{232}Th nas diferentes partes da planta submetida a cada dosagem, foi possível verificar que a razão R/PA, dos valores médios para a dose “Máxima” que o ^{238}U translocou para parte aérea, mais que o ^{232}Th . No entanto, para as doses “Média” e “Mínima” a translocação de ambos apresentou valores médios, para as respectivas doses, mais próximos entre si. Assim, para dose “Mínima”, ^{238}U e ^{232}Th , mostraram uma translocação ainda mais semelhante.

8.6.5 Absorção e distribuição de U + Th na espécie biomonitora cultivada em solo

Na tabela 17 são apresentadas as frações mássicas e respectivas concentrações de atividade dos elementos de interesse (U e Th) absorvidos pela espécie candidata a biomonitor – *Epipremnum pinnatum*.

Tabela 17: Teor de U e Th (mg kg^{-1}) e concentração de atividade (Bq kg^{-1}) encontrado na *Epipremnum pinnatum*, espécie candidata a biomonitor como complementação no PMA/CDTN.

	OUTUBRO/2017				MAIO/2018			
	U (mg kg^{-1}) [k = 1]	Th (mg kg^{-1}) [k = 1]	^{238}U (Bq kg^{-1}) [k = 1]	^{232}Th (Bq kg^{-1}) [k = 1]	U (mg kg^{-1}) [k = 1]	Th (mg kg^{-1}) [k = 1]	^{238}U (Bq kg^{-1}) [k = 1]	^{232}Th (Bq kg^{-1}) [k = 1]
PA	3,04±0,03	2,95±0,03	37,6±0,4	12,0±0,1	1,08±0,01	1,020±0,002	13,3±0,1	4,15±0,01
R	14,0±0,8	13,2±0,8	174±9	54±3	15,7±0,2	16,52±0,01	194±3	67,29±0,04

PA = Parte Aérea; R = Raiz.

Observou-se que as frações mássicas na *Epipremnum pinnatum* foram muito próximas nos dois períodos sazonais em que o experimento controlado foi realizado. Se comparada com as plantas (*Brachiaria sp.* e *Cynodom sp.*) originalmente utilizadas no PMA/CDTN, a *Epipremnum pinnatum* mostrou maior capacidade de absorção dos elementos de interesse em ambos períodos.

Houve um efeito significativo para a absorção em cada parte da planta, sendo que a raiz apresentou maiores valores que a parte aérea ($p < 0,001$). A *E. pinnatum* apresentou a raiz com uma média maior que a raiz da *Brachiaria* para ambos os elementos no período chuvoso ($p = 0,045$ para Th e $p = 0,010$ para U). Para o período seco, *E. pinnatum* apresentou valores maiores que *Cynodon* na raiz para ambos os elementos ($p = 0,03$ para Th e $p = 0,007$ para U) e na parte aérea apenas para U ($p = 0,031$). Uma possível causa, muito discutida na literatura para justificar as diferenças de absorção entre plantas, pode ser a morfologia da raiz. Talvez isso explique por que as espécies acumulam os nutrientes preferencialmente nelas.

Alguns autores ressaltam que, dentre as variáveis morfológicas do sistema radicular, a área e o comprimento das raízes têm sido as mais importantes na caracterização de espécies e

cultivares quanto à eficiência de absorção de nutrientes (ANGHINONI *et al.*, 1989; BAPTISTA; FERNANDES; SOUZA, 2000; TACHIBANA; OHTA, 1983; VILELA; ANGHINONI, 1984). Raízes mais longas e mais finas, para uma mesma massa (mesmo consumo metabólico), resultam em maior área superficial e, conseqüentemente, maior capacidade de absorver elementos, especialmente em relação à eficiência de absorção de metais, uma vez que são pouco móveis no solo (ANGHINONI *et al.*, 1989). Ernani *et al.* (1994) destacam que a absorção de nutrientes é proporcional ao volume de solo ocupado pelas raízes; assim, a exploração de um grande volume de solo pelas raízes é importante, principalmente, para a absorção dos nutrientes que se deslocam pelo mecanismo de difusão (VILELA; ANGHINONI, 1984). As raízes com menor diâmetro médio exploram por meio do investimento de fotoassimilados pois raízes mais finas podem explorar maior volume de solo por unidade de massa radicular (ARAÚJO; MACHADO, 2006).

Se for comparada a captação de U e Th pelas raízes das plantas, pode-se observar que U mostrou maior preferência em comparação com Th. Isso se repetiu para as espécies do PMA/CDTN também submetidas a esse experimento. No solo o U pode ser mais móvel do que o Th e desta forma, a sua biodisponibilidade para as plantas será bem maior. portanto, mais biodisponível se comparado ao Th (MORTON *et al.*, 2002). Embora U e Th estejam quimicamente e geologicamente ligados (IVANOVICH 1991; EVANS *et al.*, 1997), é claro que o comportamento deles no sistema radicular das espécies pode ser diferente. O urânio pode formar compostos complexos (THIRY *et al.*, 2005), que podem ser facilmente tomados pelas plantas. No solo, Th rapidamente transfere-se para a forma insolúvel e pode estar firmemente ligado à superfície das partículas do solo (KATZIN e SONNEBERG, 1986). No entanto, foi relatado que Th na rizosfera pode criar complexos solúveis com ácidos húmicos (REILLERA *et al.*, 2002). Nesta forma, as plantas podem facilmente absorvê-lo. Segundo Mengel e Barber (1974), a capacidade diferenciada entre genótipos em desenvolver o sistema radicular pode ser interpretada como uma habilidade adaptativa para absorver os nutrientes mais eficientemente.

8.6.6 Fator de Transferência ($FT_{S/P}$)

Os valores médios para transferência de Th e U do solo (INB-Caldas) para as três espécies usadas no PMA/CDTN mostraram que *Brachiaria* ($FT_{Th} = 0,10$; $FT_U = 0,23$); *E. pinnatum* ($FT_{Th} = 0,19$; $FT_U = 0,22$); e *Cynodon* ($FT_{Th} = 0,08$; $FT_U = 0,08$).

Cabe ressaltar que quanto maior o valor de FT maior será a transferência do elemento de interesse do solo ou da solução nutritiva para a planta e, conseqüentemente, maior será

também a capacidade do vegetal em retirar “contaminantes” do sistema em que habita, nos casos que caracterizam fitorremediação.

8.6.7 Avaliação comparativa das diferentes espécies no Estudo Controlado

As espécies utilizadas neste estudo apresentam, em sua maioria, as características desejadas para a realização de investigação como complemento na avaliação da condição radiossanitária de instalações nucleares, como no é o caso do CDTN, por meio de seu Programa de Monitoração Ambiental (PMA). No entanto, dentre as espécies estudadas, destaque para a *E. pinnatum* que mostrou capacidade de resiliência ao estresse ambiental em diferentes matrizes de cultivo (solo e solução nutritiva), caracterizando-o como um biomonitor natural (Quadro 12).

Quadro 12: Matriz comparativa das características desejadas para uma espécie biomonitora em experimento controlado.

MATRIZ COMPARATIVA			
<i>Características experimentais desejáveis para o biomonitor</i>	<i>Brachiaria</i>	<i>Cynodom</i>	<i>E. pinnatum</i>
Capacidade de absorção no solo	✓	✓	✓
Capacidade de absorção na solução nutritiva	-	-	✓
Capacidade de translocação para parte aérea	✓	✓	✓
Capacidade de acúmulo no tecido vegetal	✓	✓	✓

✓ Possui a característica desejada.

- Não ocorreu neste estudo.

A matriz destaca que dentre as características desejadas a um bom biomonitor destacam-se as capacidades de absorção, translocação e acúmulo seja no solo ou na solução nutritiva. As espécies *Brachiaria* e *Cynodom* não resistiram ao experimento na solução nutritiva e apesar de possuírem outras qualidades importantes a um biomonitor, não foi possível destacar, neste estudo, a capacidade de absorção delas em solução nutritiva, contrariamente ao ocorrido com a *Epipremnum pinnatum*.

A adaptação a vários tipos de estresse é uma característica notável das plantas que, segundo Droge (2002), tem a capacidade de ativar um sistema antioxidante quando estão expostas a um estresse oxidativo, mantendo assim seu desenvolvimento normal. Elas possuem substâncias como taninos, fenóis, alcalóides, ligninas, cafeínas e amins que atuam como antioxidantes (OKADA; KANEKO; OKAJIMA, 1996). Desta forma, a propriedade antioxidante de eliminar radicais livres e/ou espécies reativas e quelar metais reativos é atribuída a alguns compostos fenólicos de plantas (DROGE, 2002).

No entanto, não foi possível atestar, por este estudo, o que de fato levou as espécies de gramíneas a sucumbir, no ambiente controlado, antes da possibilidade de submetê-las aos testes com os padrões dos elementos de interesse (U e Th).

9 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

9.1 CONCLUSÕES DO TRABALHO

Com base nos resultados obtidos, o presente trabalho de tese cumpriu com seu objetivo geral que foi o de identificar um biomonitor vegetal para U e Th que possa ser aplicado em programa de monitoração ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). A avaliação final foi embasada pela aplicação de diferentes técnicas ou metodologias de abordagem, tais como os estudos controlados, em casa de vegetação, por meio de cultivo em solução nutritiva (hidroponia) com a adição de padrões dos respectivos elementos de interesse com variação de doses; e o cultivo em solo cuja concentrações dos respectivos elementos são naturalmente elevadas em relação ao solo da área do PMA/CDTN.

9.1.1 Conclusões da ETAPA I – Verificação da metodologia de análise da radiação natural, no meio ambiente, desenvolvida pelo PMA/CDTN

Para o solo, os resultados sugerem que as frações mássicas de U e Th nas amostras coletadas em profundidade nos três pontos de coleta, nas duas estações (campanhas), se não são semelhantes à média mundial em relação a outros solos, pelo mundo, não contaminados, elas não são elevadas o suficiente para caracterizar um processo de contaminação da área. Neste contexto, constatou-se que o elemento Th esteve mais abundante nesta matriz que o U, sobretudo no período sazonal chuvoso e na profundidade de 0-15 cm.

Apesar da estatística não apontar diferenças significativas entre os pontos de amostragem do PMA, o CDTN-1 foi o ponto com maior média da fração mássica para ambos os elementos nas duas campanhas. A sazonalidade mostrou-se significativamente baixa, mas, o suficiente para ressaltar diferenças importantes no comportamento dos elementos em ambos os períodos. É perceptível nesta etapa, para a matriz solo, que a amostragem em profundidade, nos permite concluir que este é um fator importante frente ao procedimento adotado na metodologia executada no PMA/CDTN, uma vez que as maiores frações mássicas foram obtidas nos primeiros 15 cm de profundidade. Pelo menos 10 cm a mais que o amostrado na metodologia verificada.

Para as plantas, os resultados sugerem que as frações mássicas de U e Th nas espécies amostradas no campo em ambos os períodos sazonais, estão em concordância com a literatura acerca do tema, pois as frações mássicas nesta matriz foram infinitamente menores se comparadas com as do solo que as hospedam. Ainda assim, como para a matriz solo, o Th foi

o elemento que se mostrou mais abundante no tecido vegetal, sobretudo nas raízes. No entanto, contrariamente ao solo, as plantas se mostraram com maior capacidade de acúmulo dos elementos de interesse no período sazonal seco e a espécie *Brachiaria sp* que faz parte da metodologia de amostragem do PMA/CDTN se mostrou com boa capacidade de absorção, sendo superada apenas pela *Epipremnum pinnatum*, espécie muito abundante na área de estudo, mas que não faz parte da metodologia verificada. Portanto, podemos concluir, a partir dos dados obtidos para as plantas, que há a necessidade de estabelecimento de uma espécie comum a todos os pontos de amostragem, pois a falta de um fator comum entre eles não permite verificar assertivamente a relação solo-radionuclídeo-planta para tal finalidade. É perceptível nesta etapa, para a matriz planta, que a amostragem da espécie inteira (parte aérea + raiz), nos permite concluir que este é um fator importante frente ao procedimento adotado na metodologia executada no PMA/CDTN, uma vez que é nas raízes onde foram verificadas as maiores frações mássicas dos elementos de interesse.

Em relação ao fator de transferência ($FT_{S,P}$), podemos concluir que há uma leve transferência frente as plantas utilizadas na metodologia de monitoração do PMA/CDTN. Isto nos mostra que tanto a *Brachiaria* quanto a *Cynodon* são plantas adequadas a monitoração, no entanto é preciso estabelecer uma espécie biomonitora, complementar a estas, de característica perene e amplitude geográfica maior que ambas as espécies. Neste caso, concluiu-se que a espécie local que apresentou tais características complementares as espécies do PMA/CDTN foi a *Epipremnum pinnatum* (jibóia).

9.1.2 Conclusões da ETAPA II – Verificação, em ambiente controlado, da capacidade de absorção, translocação e acumulação de Th e U pelas plantas utilizadas no PMA/CDTN

O resultado apresentado pelas plantas utilizadas na metodologia verificada, em um contexto de estudo controlado, mostrou que ambas as espécies (*Brachiaria* e *Cynodon*) possuem um fator limitante, desconhecido neste estudo, quanto ao cultivo em solução nutritiva (hidroponia) que não permitiu aferir as capacidades de absorção, translocação e acúmulo dos elementos de interesse em diferentes doses.

No cultivo em solo com alto teor natural de U e Th, podemos concluir que ambas as espécies, sobretudo a *Brachiaria*, tiveram bom desempenho, mostrando que a proporção do acúmulo dos elementos, principalmente o Th no tecido vegetal, sobretudo nas raízes, é proporcional a biodisponibilidade destes no solo que as hospedam, uma vez que as frações

mássicas absorvidas foram maiores que aquelas apresentadas pelas mesmas espécies no solo da instalação (baixa disponibilidade).

9.1.3 Conclusões da ETAPA III – Estabelecimento de espécie biomonitora como complemento a metodologia do PMA/CDTN

Os resultados apresentados por uma das espécies mais abundantes na área de estudo e com ciclo de vida perene, a *Epipremnum pinnatum*, quando submetida ao estudo controlado nos permitiu concluir que tanto no cultivo em solução nutritiva quanto no cultivo em solo, a espécie teve bom desempenho permitindo verificar sua resiliência mesmo quando colocada em situações extremas.

No cultivo em solução nutritiva concluiu-se que a *E. pinnatum* mostrou capacidade de absorção progressiva frente a biodisponibilidade dos elementos de interesse em função das crescentes dosagens testadas (500, 1000 e 2000 ppm), apresentando-se o U com as maiores frações mássicas em relação ao Th, sobretudo nas raízes. Em relação as doses aplicadas, é possível concluir a partir da razão raiz/parte aérea (R/PA) que quanto maior a dose dos elementos de interesse, utilizada no substrato, maior se torna a capacidade de translocação destes para a parte aérea. É importante realçar que neste experimento não foi possível apresentar um comparativo entre as espécies, uma vez que as plantas utilizadas na metodologia do PMA/CDTN não resistiram ao cultivo em solução nutritiva.

No cultivo em solo com alto teor natural de U e Th concluiu-se que a *E. pinnatum* mostrou médias das frações mássicas maiores se comparadas às plantas utilizadas na metodologia verificada (*Brachiaria* e a *Cynodon*), sobretudo o U, acumulado preferencialmente nas raízes. No entanto, não é possível concluir com certeza qual o fator (morfológico, fisiológico ou genético) influenciou esse padrão. Em relação ao fator de transferência ($FT_{S,P}$) é possível concluir que a mesma capacidade de transferência observada para as três espécies no ambiente natural se reproduziu no experimento controlado.

Em suma, a partir dos resultados obtidos dessa tese, podemos concluir de forma geral que a *Epipremnum pinatum* se mostrou uma espécie biomonitora para U e Th. Quanto ao PMA/CDTN, este é um programa eficiente, porém necessita ser otimizado em relação a alguns aspectos da sua metodologia e a manutenção de outros, ou seja, a coleta do solo deve ser realizada em profundidade maior que os 5 cm usuais e não superior a 15 cm, manter as plantas

que são atualmente coletadas com a finalidade de compará-las com o biomonitor, a amostragem das plantas não completa (parte aérea e raiz) pode ocasionar subestimação dos resultados encontrados nas raízes (não coletadas no processo atual), contrariamente, a não limpeza das espécies antes de qualquer procedimento analítico, como processado atualmente, pode levar a superestimação dos resultados, e quanto à sazonalidade, a coleta no período chuvoso mostrou ser eficiente. Associadas a essas conclusões seguem recomendações importantes ao método de amostragem e coleta do PMA/CDTN.

9.2 RECOMENDAÇÕES

A monitoração ambiental consiste em ser um elemento básico de planejamento, saneamento e gerenciamento do meio ambiente frente à operação de um empreendimento, cujas atividades podem ser potencialmente impactantes para ele. Neste estudo, foi possível verificar que o CDTN tem suas atividades conduzidas dentro de critérios e normas específicas com intuito de garantir sua licença de operação com segurança e ao menor impacto possível.

Considerando as conclusões aduzidas, sugerem-se os seguintes itens para dar continuidade ao presente trabalho:

1. Manter a metodologia de amostragem atual no período de chuvas.
2. Continuar coletando as espécies de gramíneas utilizadas na metodologia atual para fins de comparações com o biomonitor.
3. Estabelecer uma espécie comum, biomonitora (*Epipremnum pinatum*), aos pontos de amostragem. As espécies (indivíduos jovens) utilizadas devem ser reproduzidas em ambiente controlado (hidroponia) e em seguida, plantadas nos pontos de amostragem sob a forma de canteiros.
4. Incorporar ao PMA/CDTN o método de amostragem do solo em profundidade – de 5 a 15 cm a partir do topo. Lembrando que este método é também recomendado pela USEPA.
5. Incorporar ao PMA/CDTN o método de amostragem das plantas completas (parte aérea + raiz), pois como mostrado neste estudo, há uma tendência maior de acúmulo dos elementos nas raízes em sendo menor a translocação destes para parte aérea.
6. Incorporar ao PMA/CDTN a prática de separação e limpeza das espécies vegetais antes de qualquer outro preparo, objetivando retirar ao máximo o material adsorvido na superfície de seu tecido radicular e foliar.

9.3 TRABALHOS FUTUROS

O estabelecimento de uma espécie biomonitora para os elementos U e Th no ambiente natural foram os primeiros passos dentro de uma perspectiva de estudos ambientais continuados. O objetivo é o de uma maior otimização das ações desse programa de forma a acompanhar os avanços tecnológicos das múltiplas e importantes aplicações das radiações e da energia nuclear.

Dentre as muitas perspectivas de trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir deste, destacam-se:

1. Realização de estudos laboratoriais para verificação da morfologia, fisiologia e genética das espécies utilizadas no PMA/CDTN para melhor entender o comportamento destas em relação a absorção dos elementos de interesse e os reais impactos destes para as espécies.
2. Realização de ensaios controlados (solo e solução nutritiva) com estas espécies para outros radioelementos e demais atividades de interesse da instalação, como por exemplo, nanomateriais.
3. Criar um Programa de Educação Ambiental com a promoção de campanhas, atividades e material educativo para sensibilização da comunidade interna e externa ao instituto sobre a segurança nuclear e ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, R.N.; NAIR, A.G.C.; REDDY, A.V.R.; MANOHAR, S.B. **Validation of a neutron activation analysis method using *ko*-standardization**. Appl. Radiation Isotopes, 57:391–398, 2012.
- AERY, N.C., JAIN, G.S. **Effect of uranyl nitrate on seed germination and early seedling growth of *Triticum aestivum***. Biologia 52:115–119, 1997.
- ALVES, E.S. **The effects of the pollution on wood of *Cecropia Glazioui* (Cecropiaceae)**. Iawa Journal 16: 69-80, 1995.
- ALVES, E.S.; GIUSTI, P.M.; DOMINGOS, M.; SALDIVA, P.H.N.; GUIMARÃES, E.T.; LOBO, D.J.A. **Estudo anatômico foliar do clone híbrido 4430 de *Tradescantia*: alterações decorrentes da poluição aérea urbana**. Revista Brasileira de Botânica 24: 567-576, 2001.
- ALVES, E.S.; PEDROSO, A.N.V.; DOMINGOS, M.; GUIMARÃES, E.T.; SALDIVA, P.H.N. **Biomonitoramento do potencial mutagênico do ar em laboratórios e herbário do Instituto de Botânica por meio do bioensaio trad-mcn**. Hoehnea: 89-94, 2003.
- ALVES, V. **Análise dos efeitos dos poluentes de fábrica de cimento em plantas bioindicadoras: *Nicotiana tabacum* L. (solanaceae) e *Zinnia elegans* cav. (asteraceae)**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- ARAMBURU, X.O., BISBAL, J. J. **Radiaciones ionizantes: utilización y riesgos**. Barcelona: Edicions UPC, 1994.
- ARAÚJO, S. M. V. G. **Licenciamento Ambiental e Legislação**. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Disponível em: <http://bd.camara.gov.br>. Acessado em: abril de 2017.
- ARMELIN, M.J.A.; ABREU-JUNIOR, C.H.; TREVIZAN, A.; SAIKI, M. **Characterization and phytoavailability evaluation of micronutrients and contaminants in some Brazilian phosphate fertilizers**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 278:513-516, 2008.
- ARNDT, U.; FLORES, F.; WEINSTEIN, L. **Efeitos do flúor sobre as plantas: diagnose de danos na vegetação do Brasil**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1995. 153 p. 1995.
- ARNDT, U.; SCHWEIZER, B. **The use of bioindicators for environmental monitoring in tropical and subtropical countries**. In: Signals from the environment. Ellenberg *et al.* (eds.). Biological monitoring. Vieweg, Eschborn. p. 199-298, 1991.
- ASSIS, W.L. **Análise do campo térmico e hídrico em Belo Horizonte**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, 153p. 2001.
- BAKER, A.J.M. **Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals**. J. Plant Nutr. 3:643–654, 1981.

- BARIA, R.; CANO, N.F.; SILVA-CARRERA, B.; ETZABEL, N.; WATANABE, S.; NEVES, E.G.; TATUMI, S.H.; MUNITA, C.S. **Archaeometric studies of ceramics from the São Paulo II archaeological site.** Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 306:721-727, 2015.
- BATALHA, J.R.F.; GUIMARÃES, E.T.; LOBO, D.J.A.; LICHTENFELS, A.J.F.C.; DEUR, T.; CARVALHO, H.A.; ALVES, E.S.; DOMINGOS, M.; RODRIGUES, G.S.; SALDIVA, P.H.N. **Exploring the clastogenic effects of air pollutants in São Paulo (Brazil) using the *Tradescantia* micronuclei assay.** Mutation Research, 426: 229-232, 1999.
- BEHRENFELD, M.J.; PRASIL, O.; BABIN, M.; BRUYANT, F. **In search of a physiological basis for covariations in light-limited and light-saturated photosynthesis.** J Phycol 40:4-25, 2004.
- BERESFORD, N.A.; WRIGHT, S.M. **Non-linearity in radiocaesium soil to plant Transfer: Fact or fiction?** Radioprotection 40 (suppl.1):67-72, 2005.
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L.P. **Técnicas de cultivo hidropônico.** Recife. UFRPE, 2000.
- BLANCO RODRÍGUEZ P.; VERA TOMÉ F.; PÉREZ FERNÁNDEZ M.; LOZANO J.C. 2006. **Linearity assumption in soil-to-plant transfer factors of natural uranium and radium in *Helianthus annuus*.** L. Sci Tot Environ 361:1-7, 2006.
- BODE, P.; GREENBERG, R.R.; FERNANDES, E.A.N. **Activation analysis: a primary (ratio) method to determine SI-Traceable values of elements content in complex samples.** Chimia, Metrology in Chemistry, 63:678-680, 2009.
- BOILEAU, L.J.R.; NIEBOER, E.; RICHARDSON, D.H.S. **U accumulation in the lichen *Cladonia rangifera*.** Part II. Toxic effects of cationic, neutral and anionic forms of the uranyl anion. *Can J Botany*, 63: 390-397, 1985.
- BONOTTO DM. **Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani.** São Paulo: Editora UNESP, 252 p. 2004.
- BOURDON, B.; HENDERSON, G. M.; LUNDSTRON, C. C.; TURNER, S. P. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry: Uranium-series Geochemistry.** The Mineralogy Society of America, v. 52, Washington DC, 655 p. 2003.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I. CANEJO, J.G.L.; MIERZWA, J.C.; BARROS, M.T.L. de; SPENCER, M. PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental.** 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 318p. 2005.
- BRASIL - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Instrução Normativa Nº 1, de 23 de fevereiro de 2015.** Disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=24/02/2016&jornal=1&pagina=59&totalArquivos=176>. Acessado em: abril de 2017.

BRASIL – Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA). **Decreto Nº 99.274 de 06 de julho de 1990**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/Antigos/D99274.htm. Acessado em: abril de 2017.

BRASIL – Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA). **Lei Nº 6.938 de 31 de agosto de 1981**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm. Acessado em: abril de 2017.

BUJOKAS, W.M. **O impacto da poeira de cimento em *Schinus terebinthifolius* Raddi. (Anacardiaceae)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

BURNS, P. C.; FINCH, R. **Reviews in Minerology – Uranium: Minerology, Geochemistry and Environment**. The Mineralogy Society of America, v. 38, Washington DC, 679 p. 1999.

CAIRNS Jr., J.; & PRATT, J. R., 1993. **A history of biological monitoring using benthic macroinvertebrates**. In: *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates* (D. M. Rosenberg & V. H. Resh, ed.), p. 10-27, New York: Chapman & Hall, 1993.

CAIRNS Jr., J.; McCORMICK, P. V.; NIEDERLEHNER, B. R. **A proposal framework for developing indicators of ecosystem health**. *Hydrobiologia*, 263:1-44, 1993.

CALLISTO, M. **Bioindicadores de Qualidade de Água**. Departamento de Biologia Geral, Instituto de Ciências Biológicas, UFMG. (2005). Disponível em: http://labs.icb.ufmg.br/benthos/index_arquivos/Page1631.htm. Acesso em: novembro de 2016.

CARNEIRO, R.M.A.; TAKAYANAGUI, A.M.M. **Estudos sobre bioindicadores vegetais e poluição atmosférica por meio de revisão sistemática da literatura**. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 13:26-44, 2009.

CARTER, P.J.; NIMMO, H.G.; FEWSON, C.A.; WILKINS, M.B. **Circadian rhythms in the activity of a plant protein kinase**. *EMBO J*, 10:2063–2068, 1991.

CDTN – CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. **Programa de Monitoração Ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear**. 2014.

CDTN – CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. **Programa de Monitoração Ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear**. 2018.

CDTN – CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. **Relatório de Atividades 2003-2006**. Caderno 3, 2006.

CECOR – CENTRO DE COMUNICAÇÃO RURAL. **Revista Casa da Agricultura “Produção em Ambiente Protegido”**, Ano 14, nº 2. abr-mai-jun/2011. Disponível em: www.cati.sp.gov.br/revistacasadaagricultura/06/ca06.pdf. Acessado em: abril de 2017.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Monitoramento de desenvolvimento das espécies da Mata Atlântica introduzidas em três bosques experimentais em Cubatão – SP 1996 a 1999**. São Paulo. 2000. 110p. 1999.

CHANG, P.C. KIM, K-W.; YOSHIDA, S.; KIM, S-Y. **Uranium accumulation of crop plants enhanced by citric acid**. Environmental Geochemistry and Health, Dordrecht, 27: 529-538, 2005.

CHATT, A.; DESILVA, K.N.; HOLZBECHER, J.; STUART, D.C.; TOUT, R.E.; RYAN, D.E. **Cyclic neutron activation analysis of biological and metallurgical samples**. Canadian Journal of Chemistry, 59: 1600-1664, 1981.

CHAVES, A.C.F.; SILVA, E.A.M.; AZEVEDO, A.A.; CANO, M.A.O.; MATSUOKA, M.K. **Ação do flúor dissolvido em chuva simulada sobre a estrutura foliar de *Panicum maximum* Jacq. (Colonião) e *Chloris gayana* Kunth. (Capim – Rhodes) – Poacea**. Acta Botânica Brasilica 16: 395-406, 2002.

CHEN, J. **A Review of Radon Dose. Radiation Protection Management**. v.22, n.4: 27-31, 2005.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN 133: Dispõe sobre o descomissionamento de usinas nucleoeletricas. (Resolução CNEN 133/12)**. Disponível em: <http://www.foroiberam.org/documents/193375/781944/>. Acessado em: abril de 2017.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NE 1.04: Estabelece o Licenciamento de Instalações Nucleares (Resolução CNEN 15/02)**. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm104.pdf>. Acessado em: abril de 2017.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NN-3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. (2011). Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>. Acessado em: abril de 2017.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Coefficiente de Dose para Exposição do Público**. Posição Regulatória 3.01/011:2011. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas>. Acessado em: abril de 2017.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Relatório de Gestão do Exercício de 2016**. 2017.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Proposta da Indústria para o aprimoramento do Licenciamento Ambiental**. Gerência Executiva de Meio Ambiente e Sustentabilidade – GEMAS, 2013.

COSTA, R.G.S.; FERREIRA, C.C.M. **Estudo biogeográfico das áreas verdes e da arborização ligada ao sistema viário na região central da cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais**. Revista Caminhos de Geografia, 8:143-153, 2007.

COUGHTREY, P.J.; & THORNE, M. C. **Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems**. A Critical Review of Data, v. 1. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1983.

COZZOLINO, S.M.F. **Biodisponibilidade de minerais**. R. Nutr. Campinas, 10(2): 87-98, jul./dez., 1997.

D'SOUZA, T.J.; MISTRY, K.B. **Comparative uptake of thorium-230, radium-226, lead-210 and polonium-210 by plants**. Radiat. Bot. 10:293–295, 1970.

De CORTE, F. **The k_0 -standardization method: A move to the optimization of neutron activation analysis**. Thesis, University of Gent, 1987.

De CORTE, F. **The standardization of standardless NAA**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 248: 13-20, 2001.

De CORTE, F.; De WISPELAERE, A. **The performance of k_0 -INAA in recent exercises on the certification of rare earth elements in bio-environmental materials**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 259:401-408, 2003.

De SOETE, D.; GISBELS, R.; HOSTE, J. **Neutron activation analysis**. London: Wiley – Interscience, v.34, 1972, 834 p. 1972.

De TEMMERMAN, L.; BELL, J.N.B.; GARREC, J. P.; KLUMPP, A.; KRAUSE, G.H.M.; TONNEIJCK, A.E.G. **Biomonitoring of air pollutants with plants – considerations for the future**. In: Urban air pollution, bioindication and environmental awareness. A. Klumpp, W. Ansel. & G. Klumpp (eds). Cuvillier Verlag. Göttingen. pp. 337-373, 2004.

De VOS, W.; TARVAINEN, T. **Geochemical Atlas of Europe. Part 2 - Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Figures, Maps, and Related Publications**. Espoo: Geological Survey of Finland, 2006.

DOMINGOS, M.; BOURETTE, C.; KLUMPP, A.; KLUMPP, G.; FORTI, M.C. **Impactos de poluição atmosférica sobre remanescentes florestais**. In: Parque Estadual das Fontes do Ipiranga, unidade de conservação que resiste à urbanização de São Paulo. D.C. Bicudo, M.C. Forti & C.E.M. Bicudo (orgs.). Editora Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo. pp. 221-249, 2002.

DOMINGOS, M.; KLUMPP, A.; KLUMPP, G. **Air pollution impact on the Atlantic forest in the Cubatão, region, SP, Brazil**. Ciência & Cultura, 50: 230-236, 1998.

EHLKEN, S.; KIRCHNER, G. (2002) **Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review**. J. Environ Radioact., 58:97–112, 2002.

EHMANN, W.; VANCE, D.E. **Radiochemistry and nuclear methods of analysis**. New York: John Wiley, 513 p. 1991.

EISENBUD, M. **Environmental radioactivity**. 3 ed, New York, Academic, 1987.

EL-AFIFI, E.M.; HILAL, M.A.; KHALIFA, S.M.; ALY, H.F. **Evaluation of U, Th, K and emanated radon in some NORM and TENORM samples**. Radiation Measurements, 41:627-633, 2006.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Amostragem e cuidados na coleta de solo para fins de fertilidade**. Documentos 115 – EMBRAPA – Amazônia Ocidental, 1 ed, 18 p. Manaus, 2014.

FERREIRA, E.G. **Programa de monitoração ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear**. DERL.PD 022/85, Belo Horizonte: CDTN, 1985.

FERREIRA, M.I.; PETRENKO, H.; LOBO, D.J.A.; RODRIGUES, G.S.; MOREIRA, A.; SALDIVA, P.H.N. **In situ monitoring of the mutagenic effects of the gaseous emissions of a solid waste incinerator in metropolitan São Paulo, Brazil, using the *Tradescantia* Stamen-Hair assay**. Journal of the Air & Waste Management Association 50: 1852-1856, 2000.

FEURE, G.; MENSING, T.M. **Isotopes: Principles and Applications**. 3rd ed, New Jersey: Wiley, 2005.

FREITAS, M.C.; REIS, M.A.; MARQUES, A.P.; ALMEIDA, S.M.; FARINHA, M.M.; OLIVEIRA, O. de; VENTURA, M.G.; PACHECO, A.M.G.; BARROS, L.I.C. **Monitoring of environmental contaminants: 10 years of application of *k₀*-INAA**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 257:621-625, 2003.

FRONTASYEVA, M.V. **Neutron activation analysis in the lifescience**. Physics of Particles and Nuclei, 42:332-378, 2011.

GALHARDI, J.A.; GÁRCIA-TENORIO, R.; BONOTTO, D.M.; FRANCÉS, I.D.; MOTTA, J.G. **Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mine activities in Brazil**. Journal of Environmental Radioactivity. 177: 37-47 p. 2017b.

GALHARDI, J.A.; GÁRCIA-TENORIO, R.; FRANCÉS, I.D.; BONOTTO, D.M.; MARCELLI, M.P. **Natural radionuclides in lichens, mosses and ferns in a thermal power plant and in an adjacent coal mine area in southern Brazil**. Journal of Environmental Radioactivity. 167: 43-53 p. 2017a.

GIRARDI, G.; GUZZI, G.; PAUL. **Activation Analysis by Absolute Gamma Ray Counting and Direct Calculation of Weights from Nuclear Constants**. J. Anal. Chem., 36, 8, 1588-1594, 1964.

GIRARDI, G.; GUZZI, G.; PAULY, J. **Reactor neutron activation analysis by the single comparator method**. Anal. Chem., 37:1085-1092, 1965.

GLASCOCK, M.D. **An review of neutron activation analysis**. University of Missouri, Columbia (2004). Disponível em: http://archaeometry.missouri.edu/naa_overview.html. Acessado em: abril de 2016.

GLASSTONG, S. **The Effects of Nuclear Weapons**. Oak Ridge: USAEC, 1964.

GLASSTONG, S.; SESONSKE, A. **Nuclear Reactor Engineering**. 4 ed., Chapman and Hall, New York, NY, 1994.

GRENGER, M. **Metal availability and bioconcentration in plants**. In: Heavy metal stress in plants from molecules to ecosystems. Eds. M. N. V. Prasad and J. Hagemeyer, p. 1–28, Springer Verlag, 1999.

GRENGER, M.; & LANDBERG, T. **Use of willow in phytoextraction**. Int. J. Phytorem. 1:115–123, 2003.

GUIMARÃES, E.T.; DOMINGOS, M.; ALVES, E.S.; CALDINI, N.; LOBO, D.J.A.; LICHTENFELS, A.J.F.C.; SALDIVA, P.H.N. **Detection of the genotoxic of air pollutants in around the city of São Paulo (Brazil) with the *Tradescantia*-micronucleus (Trad-MCN) assay**. Environmental and Experimental Botany 44:1-8, 2000.

HANLON, E. A. **Naturally occurring radionuclides in agricultural products: an overview**. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON NATURALLY OCCURRING RADIONUCLIDES IN AGRICULTURAL PRODUCTS, 1991, Orlando, Flórida, EUA. **Proceedings...** 1991.

HAZENFRATZ MARKS, R.; GLASCOCK, M.D.; MUNITA, C.S.; NEVES, E.G. **Study of exchange networks between two amazon archaeological sites by INAA**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 309:195-205, 2016.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. **The water–culture method for growing plants without soil**. California Agricultural Experiment Station Circular 347. In: College of Agriculture. University of California. Berkeley. 1950.

HØGDAHL, O.T. **Neutron absorption in pile neutron activation analysis**. Michigan. Univ., Ann Arbor. Michigan Memorial-Phoenix Project, 1962.

HOROVITZ, C.T. et al. **The content of scandium, thorium, silver and other trace elements in different plant species**. Plant Soil. 40:397–403, 1974.

HYPERSLAB-2009. **Quick start guide for main module**. HyperLabs software, Budapest, Hungary. Disponível em: www.hlabsoft.com. Acessado em: julho de 2016.

IAEA- – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Certified Reference Material**. IAEA SOIL-7, Trace elements in soil, Vienna, Austria, 2000.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Collection and Preparation of Bottom Sediment Samples for Analysis of Radionuclides and Trace Elements**. IAEA-TECDOC-1360. Vienna, 2003.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment**. Vienna, 2001, IAEA-Safety Reports Series 19, 2001.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments**. Tech Rep Series No. 472, Vienna, 2010.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources**. Safety Series No. 115, Vienna, 1996.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Practical aspects of operating a neutron activation analysis laboratory**. IAEA – TECDOC-564, Vienna, 1990.

IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Amostragem de Solo para Análise Química: Plantio direto e convencional, culturas perenes, várzeas, pastagens e campineiras**. Circular N° 90, 28 p. Londrina, 1996.

ICHIHASHI, H.; MORITA, H.; HONDA, K.; TATSUKAWA, R. **Distribution of rare earth elements in non-cultivated soil in western part of Shikoku Island, Japan**. *Geochemistry*, V. 24, p. 115-21, 1990.

ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Publication 103:2-4, 2007.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Climatologia**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acessado em: dezembro de 2017.

INSTRUÇÃO NORMATIVA N° 1, de 23 de fevereiro de 2015/IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=24/02/2016&jornal=1&pagina=59&totalArquivos=176>. Acessado em: abril de 2017.

IRRM – INSTITUTE FOR REFERENCE MATERIALS AND MEASUREMENTS. **Certificate of analysis: certified reference material IRMM-530R**. Geel: (gold mass fraction in Al-(0.1%) Au Alloy), 2002.

ISLAMOVIĆ, S.A.; RADOVIĆ-RAJEVIĆ, G.B.; ZOVKO, E.A. **Determination of Radionuclide Activity of U-238 in Wheat using Gamma Spectrometric Method**. *Bulletin of the Chemists and Technologists of Bosnia and Herzegovina*, 39:11-14, 2012.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Guide 13528 (2005) Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons.** Guide 13528, ISO Geneve, Switzerland, 2005.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Specifies an instrumental method for the routine determination of pH in soil.** ISO 10390, ISO Geneve, Switzerland, 2005.

IUR – INTERNATIONAL UNION OF RADIOECOLOGISTS, IUR. **VIth Report of the Working Group Soil-to-Plant Transfer Factors.** IUR report prepared by RIVM, Bilthoven, Netherlands, 1989.

IVANOVICH, M.; HARMON, R.S. **Uranium Series Disequilibrium.** Charendon Press, Oxford, 571 p. 1982.

JACÍMOVIĆ, R; SMODIS, B.; BUCAR, T.; STEGNAR, P. **k_0 -NAA quality assessment by analysis of different certified reference materials using the KAYZERO/SOLCOI software.** Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 257:659-663, 2003.

JOHNSON, R.K.; WIEDERHOLM, T.; ROSENBERG, D.M. **Freshwater biomonitoring using individual organisms, populations, and species assemblages of benthic macroinvertebrates.** In: Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates (D. M. Rosenberg & V. H. Resh, ed., pp. 40-158, New York: Chapman & Hall, 1993.

k_0 NUCLEAR DATA COMMITTEE (2012). Disponível em: <http://www.icaa-mtaa.org/k0data/default.aspx>. Acessado em: maior de 2018.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Elements of group III. In: KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H (eds.). **Trace elements in soils and plants.** Florida: CRC, p.127-150, 1985.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants.** 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1992.

KABATA-PENDIAS, A; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

KAMINO, L.H.Y. **Estação ecológica da Universidade Federal de Minas Gerais: Flora vascular e estudo comparativo de sua estrutura arbórea com as de outros fragmentos florestais da Apa-Sul, MG.** Dissertação de Mestrado (UFMG), 2002.

KANNAN, V., RAJAN, M.P., IYENGAR, M.A.R., RAMESH, R. **Distribution of natural and anthropogenic radionuclides in soil and beach sand samples of Kalpakkam (India) using hyper pure germanium (HPGe) gamma ray spectrometry.** Applied Radiation and Isotopes 57:109-119, 2002.

KAPLAN, I. **Física Nuclear.** 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.

KATHNEN, R.L. **NORM sources and their origins**. Applied Radiation and Isotopes. 49:149-168, 1998.

KAYZERO FOR WINDOWS®. **User's Manual, for reactor neutron activation analysis (NAA) using the k_0 standardisation method**. V. 2.46, 2011.

KETCHAM, R.A. **An improved method for determination of heat production with gamma-rays scintillation spectrometry**. Cherm. Geol.,130: 175-194, 1996.

KIM, H.Y.; COTE, G.G.; CRAIN, R.C. **Effects of light on the membrane potential of protoplasts from *Samanea saman pulvini***. Involvement of the H-ATPase and K channels. Plant Physiol 99:1532–1539, 1992.

KIM, H.Y.; COTE, G.G.; CRAIN, R.C. **Potassium channels in *Samanea saman* protoplasts controlled by phytochrome and the biological clock**. Science 260:960–962, 1993.

KLUMPP, A. **Utilização de bioindicadores de poluição em condições temperadas e tropicais**. In Indicadores ambientais. Temas atuais (H.L. Martos, N.B. Mais & W. Barrella, eds.). PUC São Paulo, São Paulo, 2001.

KLUMPP, A.; HINTEMANN, T.; LIMA, J.S.; KANDELER, E. **Bioindication of air pollution effects near a copper smelter in Brazil using mango trees and soil microbiological properties**. Environmental Pollution 126: 313-321, 2003.

KLUMPP, A.; KLUMPP, G.; DOMINGOS, M. **Bioindication of air pollution in the tropics**. GefahrstoffeReinhaltung der Luft 56:27-31, 1996.

KNOLL, G. F., **Radiation detection and measurements**. 2° Ed. New York, John Wiley & Sons, 754p. 2000.

KÖHL, M.; MAGNUSSEN, S. S.; MARCHETTI, M. **Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory**. Tropical Forestry, Springer Book, 373 p. 2006.

KRUPA; S.V.; LEGGE, A.H. **Foliar injury symptoms of Saskatoon service berry (*Amelanchier alnifolia* Nutt.) as a biological indicator of ambient sulfur dioxide exposures**. Environmental Pollution, v.106, p.449-454, 1999.

KUBEŠOVÁ M.; KUČERA J. **Comparison of Kayzero for Windows and k_0 -IAEA software packals for k_0 standardization in neutron activation analysis**. Nucl. Instrum. Methods A 654:206-212, 2011.

KUBEŠOVÁ M.; KUČERA J. **Validation of k_0 standardization in neutron activation analysis** –. The use of Kayzero for Windows programme at the Nuclear Physics Institute, Řež. Nucl. Instrum. Methods A 622:403-406, 2010.

KUBEŠOVÁ, M. *ko standardization in neutron activation analysis at LVR-15 reactor in Řež*. Czech Technical University in Prague Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Department of Dosimetry and Application of Ionizing Radiation, Thesis, 2012.

KUČERA, J. *et al.* **INAA petrological study of sandstones from the Angkor monuments**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 278:299-306, 2008.

LAMARSH, J.R.; BARATTA, A.J. **Introduction to nuclear engineering**. 3 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001, 783p. 2001.

LAURIA, C.D.; SACHI, I.A.; PEREIRA, J.C.; ZEHARO, R. **Determination of Cesium-137 soil-to-plant concentration ratios for vegetables in Goiania city, Brazil**. J. Radioanal. Nucl. Chem. 182:91-96, 1994.

LAURIA, D.C.; VASCONCELLOS, L.M.H.; GODOY, M.L.P.; ACAR, M.E.D.; ROLDÃO, L.L. **Razão de concentração planta-solo para ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra e ^{228}Ra em uma região brasileira rica em monazita**. Revista Brasileira de Toxicologia. 11:31-35, 1998.

LEE, J.D. **Química inorgânica: Um novo texto conciso**. 3 ed. São Paulo: Edgard Bluecher, 1980.

LEI Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981: Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=313>. Acessado em: abril de 2017.

LIMA E. C.; CAVALLI-MOLINA, S. **Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético**. Ciência Rural, 31: 531-541, 2001.

LIMA, J.F.; FERNÁNDEZ, E.B.; FAWCETT, W.N. **Mangifera indica and Phaseolus vulgaris in the bioindication of air pollution in Bahia, Brazil**. Ecotoxicology and Environmental Safety 46:275-78, 2000.

LOUZADA, J. N. C. **Bioindicadores de qualidade ambiental**. Departamento de Biologia, UFL. V Congresso Brasileiro de Ecologia. Porto Alegre, RS, 2001.

LYON Jr, W.S. **Guide to activation analysis**. Princeton: Van Nostrand, 186 p. 1964.

MARANHO, L.T.; GALVÃO, F.; PREUSSLER, K.H.; MUNIZ, G.I.B.; KUNIYOSHI, Y.S. **Efeitos da poluição por petróleo na estrutura da folha de *Podocarpus lambertii* Klotzsc ex Endl., Podocarpaceae**. Acta Botânica Brasílica 20:615-624, 2006.

MARKERT, B. **Plants as biomonitors indicators for heavy metals in the terrestrial environments**. VCH Publishers.; New York, 1993.

MATSUURA, K. **Bioindicadores em Ecossistemas**. Unesco, 2000.

MAZZILLI, B.C.; MÁDUAR, M.F.; CAMPOS, M.P. **Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental**. (2011). Disponível em:

https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/201103311026310.Apostila%20TNA-5754%20abr-2011.pdf. Acesso em: novembro de 2017.

MAZZILLI, B.P., SAUEIA, C.H.R., JACOMINO, V.M.F., MELLO, J.W.V. **Natural radionuclides and metals intake into soya, corn and lettuce grown on soil amended with phosphogipsita**. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 92:1574-1586, 2012.

MENEZES, M. Â. B. C & JACIMOVIC, R. **k_0 -INAA quality assessment by analysis of soil reference material GBW07401 using the comparator and neutron flux monitor approaches**. *Appl. Radiat. Isot.* 69: 1057–1063, 2011.

MENEZES, M. Â. B. C. e JACÍMOVIĆ, R. **Implementation of a methodology to analyse cylindrical 5-g sample by neutron activation technique, k_0 method, at CDTN/CNEN, Belo Horizonte, Brazil**. *Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300:523-531, 2014.

MENEZES, M. Â. B. C. e JACÍMOVIĆ, R. **Optimised k_0 -instrumental neutron activation method using the TRIGA MARK I IPR-R1 reactor at CDTN/CNEN, Belo Horizonte Brazil**. *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research*, 564:707-715, 2006.

MENEZES, M. Â. B. C., SABINO, C. V. S. **Thorium: determination by CDTN, Brazil**. *Czechoslovak Journal of Physics*, 49:359-365, 1999.

MENEZES, M. Â. B. C.; SABINO, C. de V.S.; FRANCO, M.B.; KASTNER, G.F.; MONTOYA ROSSI, E.H. **k_0 -Instrumental neutron activation analysis establishment at CDTN, Brazil: a successful story**. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 257:627-632, 2003.

MENZEL, R.G. **Soil-plant relationships of radioactive elements**. *Health Phys.* 11:1325-1332, 1965.

MICHALIK, B.; BROWN, J.; KRAJEWSKI, P. **The fate and behaviour of enhanced natural radioactivity with respect to environmental protection**. *Environmental Impact Assessment Review*, 38:163–171, 2013.

MILARÉ, E. **Direito do ambiente**. 3ª ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 136-152, 2005.

MODNA, D.; VECCHIA, F. **Calor e áreas verdes: Um estudo preliminar do clima de São Carlos, São Paulo**. ENCAC-COTED. Curitiba, 661-668, 2003.

MORAES, R.M.; KLUMPP, A.; FURLAN, C.M.; KLUMPP, G.; DOMINGOS, M.; RINALDI, M.C.S.; MODESTO, I.F. **Tropical fruit trees as bioindicators of industrial air pollution in southeast Brazil**. *Environment International*. 28:367-74, 2002.

MOURA, I.F.S. **Avaliação de MP₁₀ na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Nuclear. Belo Horizonte, 144 p. 2016.

MYUNG, C.J.; THORNTON, I. **Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb–Zn mine in Korea.** *Sci Tot Environ* 198:105–121, 1987.

NAKAZATO, R.K.; RINALDI, M.C.S.; DOMINGOS, M. **Tropical trees: Are they good alternatives for biomonitoring the atmospheric level of potential toxic elements near to the Brazilian Atlantic rainforest?** *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 134: 72-79, 2016.

NATARAJAN, K.A.; SUBRAMANIAN, S.; JACQUES-BRAUN, J. **Environmental impact of metal mining- biotechnological aspects of water pollution and remediation – an Indian experience.** *Journal of Geochemical Exploration*, 88:45–48, 2006.

NCRP – NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **NCRP. Radiological Assessment: Predicting the Transport, Bioaccumulation, and Uptake by Man of Radionuclides Released to the Environment.** NCRP Report 76, 1984a.

NCRP – NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **Exposure from the Uranium Series with Emphasis on Radon and its Daughters.** NCRP Report 77, 1984b.

NEA – NUCLEAR ENERGY AGENCY. **Uranium: resources, production and demand.** A joint report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, Paris, 1997.

NEVES, C.D.B. **Zoneamento ambiental da Estação ecológica da Universidade Federal de Minas Gerais: Subsídio à implantação de unidade de conservação urbanas.** Dissertação de Mestrado. IGC, Universidade Federal de Minas Gerais, 162 p. 2002.

NRCRM – NATIONAL RESEARCH CENTRE FOR CRM, INSTITUTE OF GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION COMPONENTS. **Certified Reference Material.** GBW 0805, Tea Leaves. Langfang, China, 1987.

OJOVAN, M.I., LEE, W.E. **An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation.** Great Britain: Elsevier Ltda.: 2005. ISBN: 978-0-08-044462-8, 2005.

OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.; CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil: Guia auxiliar para seu reconhecimento.** Jaboticabal: FUNEP. 201 p. 1992.

OTERO, X.L.; MACIA, S.F. **Variation with depth and season in metal sulfides in salt marsh soils.** *Biogeochemistry*, 61:247–268, 2002.

PANTELICĂ, A.; OPREA, C.; FRONTASYEVA, M.; GEORGESCU, I.I.; PINCOVSCHI, E.; CATANĂ, L. **Contamination of crop vegetation with trace elements from a fertilizer plant: An INAA study.** *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 262:111-118, 2004.

PASCHOA, A. S., GODOY, J. M. **The areas of high natural radioactivity and TENORM wastes**. International Congress Series 1225, 3– 8. Great Britain: Elsevier Inc. 2002.

PASCHOA, A. S.; STEINHÄUSLER, F. **Orphan sources of NORM/TENORM throughout the World**. Chapter *in* Radioactivity in the Environment, 7:1017-1024, 2005.

PASCHOA, A.S. **More than forty years of studies of natural radioactivity in Brazil**. Technology, 7, 193–212. Radioactivity in the Environment. Elsevier Ltd. Vol.7 ISSN 1569-4860/DOI 10.1016/S1569-4860(04)07125-6, 2000.

PEIXOTO, C. M; PÊGO, V. D. **Relatório de avaliação dos resultados analíticos do programa de monitoração ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1991 e 1992**. Publicação CDTN-827/96, out. 1996, Belo Horizonte, 1996.

PEIXOTO, C. M; PÊGO, V. D. **Relatório de avaliação dos resultados analíticos do programa de monitoração ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1993 a 1995**. Publicação CDTN-830/97, mar. 1997, Belo Horizonte, 1997.

PELAES, A. C. O.; VENÂNCIO, R. J. M.; DUTRA NETO, A.; MENEZES, M. Â. B. C.; JACIMOVIĆ, R. **Validação de análise por ativação neutrônica, método k_0 , aplicada a amostra de referência certificada**. Belo Horizonte: IV SENCIR, 1:101-106, (2018). Disponível em: http://sencir.nuclear.ufmg.br/template/ANAIS_IV_SENCIR_2018_VERSAO_F.pdf. Acessado em: dezembro de 2018.

PENNA-FRANCA, E.; ALMEIDA, J.C.; BECKER, J.; EMMERICH, M.; ROSER, F.X.; KEGEL, G.; HAINSBERGER, L.; CULLEN, T.L.; PETROW, H., DREW, R.T.; EISENBUD, M. **Status of investigations in the Brazilian areas of high natural radioactivity**. Health Physics., 11:699–712, 1965.

PÉREZ, D. V.; SALDANHA, M. F. C.; MOREIRA, J. C.; VAITSMAN, D. S. **Concentração Total de Urânio e Tório em Alguns Solos Brasileiros**, **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA**, 33:1417-1423, 1998.

PINTO, A. J.; MESQUIRA, A.Z.; TELLO, C. C. O. **Simulação da evolução da potência de reatores nucleares de pesquisa utilizando o software LabView®**. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecânica, 14:51-52, 2010.

PRADO-FILHO, J.F. **Uso de bioindicadores para monitoramento do ar**. Ambiente. 7(1): 57-64, 1993.

PULHANI, V. A.; DAFAUTI, S.; HEGDE, A. G.; SHARMA, R. M.; MISHRA, U. C. **Uptake and distribution of natural radioactivity in wheat plants from soil**. J. Environ. Radioact. 79: 31–46, 2005.

RADHAKRISHNA, A. P. H. M.; SOMASHEKARAPPA, Y.; NARAYANA, K.; SIDAPPA, A. **New natural background radiation area on the southwest coast of India**. Health Physics 65: 390-395, 1993.

RAYNO, D. R. **Assimilation of thorium isotopes into terrestrial vegetation**. *Sci. Total Environ.* 80:243–266, 1989.

REIS, M.; FREITAS, M.C.; DUNG, H.M.; MATEUS, A.; PAIVA, I. MADRUGA, M.J.; GONÇALVES, M.A.; SILVA, L.; DIONÍSIO, I. **Characterization of geomaterials from NE Portugal using k_0 -based instrumental neutron activation analysis (k_0 -INAA) and gamma spectrometry methods**. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 294:363-369, 2012.

REIS, P. A. L.; COSTA, A. L.; PEREIRA, C.; VELOSO, M. A. F.; MESQUITA, A. Z.; SOARES, H. V.; BARROS, G. P. **Assessment of a RELAP-5 model for the IPR-R1 TRIGA research reactor**. *Annals of Nuclear Energy*, 37:1341-1350, 2010.

REIS, R. G. **NORM: Guia Prático**. Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), 1 ed, Rio de Janeiro, 236 p. 2016.

ROCHEDO, E.R.R.; WASSERMAN, M.A. **Avaliação de impacto radiológico ambiental**. In: ROCHEDO, E. R. R. **Avaliação do Impacto Radiológico Ambiental**, capítulo 5, Rio de Janeiro, IRD, 2003.

RUTGERS van der LOEFF, M.M.; VÖGE, I. **Thorium 234/Uranium 238 activity ratios measured in surface water along the cruise track of ANT-XVIII/2 (EisenEx)**. Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, PANGAEA, 2001.

SALLES, P. M. B.; MENEZES, M. Â. B. C.; SATHLER, M. M.; MOURA, R. R.; CAMPOS, T. P. R. **Elemental composition of dietary supplements most consumed in Belo Horizonte, Brazil, analysed by k_0 -INAA**. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1:1-11, 2017.

SANTOS, A. J. G. **Avaliação do impacto radiológico ambiental do fosfógeno brasileiro e lixiviação de ^{226}Ra e ^{210}Pb** . 165 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2002.

SANTOS, E. E.; LAURIA, D. C.; AMARAL, E. C. S., ROCHEDO E. D. **Daily Ingestion of Th-232, U-238, Ra-226, Ra-228 and Pb-210 in Vegetables by Inhabitants of Rio de Janeiro City**. *J. Environ. Radioactivity*. 62:75-86, 2002.

SANTOS, J. O.; MUNITA, C. S.; SOARES, E. A. A. **Provenance studies in Amazon basin by means of chemical composition obtained by INAA**. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 306: 713-719, 2015.

SANTOS, R.N.C.; MINAMI, K. **Cultivo Hidropônico do Meloeiro**. Série Produtor Rural (Edição Especial), ESALQ/USP, 38 p. Piracicaba, 2002.

SATHLER, M. M.; SALLES, P. M. B.; OLIVEIRA, H. S.; MENEZES, M. Â. B. C. **Amostras grandes por ativação neutrônica, método k_0** . Belo Horizonte: IV SENCIR (2018). Disponível

em: http://sencir.nuclear.ufmg.br/template/ANAIS_IV_SENCIR_2018_VERSAO_F.pdf. Acessado em: dezembro de 2018.

SCERBO, R.; POSSENTI, L.; LAMPUGNANI, L.; RISTORI, T.; BARALE, R.; BARGHIGIANI, C. **Liquen (*Xanthoria parietina*) biomonitoring trace elemento contamination and air quality assessment in Livorno Province (Tuscany, Italy)**. The Science of total Environment, 241:91-106, 1999.

SCHAUBS, M.; SKELLY, J.M.; ZHANG, J. W.; FERDINAND, J. A.; SAVAGE, J. E.; STEVENSON, R. E.; DAVIS, D. D.; STEINER, K. C. **Physiological and foliar symptoms response in the crowns of *Prunus serotina*, *Fraxinus Americana* and *Acer rubrum* canopy trees to ambient under forest conditions**. Environmental Pollution 133: 553-567, 2005.

SHACKLETTE, H. T.; BOERNGEN, J. G. **Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States**. US Geol Surv Prof Paper 1270:1–105, 1984.

SHEPPARD, S. C. **Background radionuclide concentrations in major environmental compartments of natural ecosystems**. Report by EcoMatters for the Canadian Nuclear Safety Commission, 2004.

SHEPPARD, S. C.; EVENDEN, W. G. **The assumption of linearity in soil and plant concentration ratios: An experimental evaluation**. J Environ Radioactivity, 7:221–247, 1988.

SHEPPARD, S. C.; MARSHA, I.; SHEPPARD, M. I.; GALLERAND, M. O.; SANIPELLI, B. **Derivation of Ecotoxicity Thresholds for Uranium**. J Environ Radioact, 79:55–83, 2005.

SHTANGEEVA I. **Uptake of uranium and thorium by native and cultivated plants**. J. Environ. Radioact. 101:458–463, 2010.

SHTANGEEVA, I. AYRAULT, S. JAIN, J. **Thorium uptake by wheat different stages of plant growth**. Journal of Environmental Radioactivity. 81:283-289, 2004.

SILVA, C.M.; SOUSA, G.H.; AMARAL, R.S. **Determinação da concentração de urânio em poços de abastecimento público da região urano-fosfática de Pernambuco**. Physicae, São Paulo, 3:59-63, 2002.

SILVA, J. A. R.; SOUZA, W.; SABINO, C. V. S.; MENEZES, M. Â. B. C. **Delayed fission neutron method applied at CDTN/CNEN**. Proceeding of International Atlantic Nuclear Conference, Santos: INAC-2007, CDROM, 2007.

SILVA, J. A. R.; SOUZA, W.; SABINO, C. V. S.; MENEZES, M. Â. B. C.; ROCHA, Z. **Efficiency of delayed fission neutron system applied at CDTN/CNEN**. Proceeding of International Atlantic Nuclear Conference, Rio de Janeiro: INAC-2009, CDROM, 2009.

- SILVA, L. C.; AZEVEDO, A. A.; SILVA, E. A. M.; OLIVA, M. A. **Effects of simulated acid rain on the growth of five species Brazilian tree species and anatomy of the most sensitivity species (*Joannesia principes*)**. Australian Journal of Botany 53:789-96, 2005a.
- SILVA, L. C.; OLIVA, M. A.; AZEVEDO, A. A.; ARAÚJO, J. M.; AGUIAR, R. M. **Micromorphological and anatomical alterations caused by simulated acid rain in restinga plants: *Eugenia uniflora* and *Clusia hilariana***. Water, Air, and Soil Pollution 168:129-43, 2005b.
- SIMONITS, A.; De CORTE, F.; HOSTE, J. **Single-comparator methods in reactor neutron activation analysis**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 24:31-46, 1975.
- SOUZA, R.M.G.P.; MESQUITA, A.Z. **Reactivity balance in the IPR-R1 TRIGA reactor**. Progress in Nuclear Energy, 53:1132-1135, 2011.
- STAVEN, L.H.; RHOADS, K.; NAPIER, B.A.; STRENGE, D.L. **Compendium of transfer factors for agricultural and animal products**. PNNL-13421. The U.S. Department of Energy, Washington, 16 p. 2003.
- STOKINGER, H.E. **Uranium, U**. In: CLAYTON, G.D.; CLAYTON, R.E. (eds). **Industrial hygiene and toxicology**, v. 2A, 3rd ed. New York, NY: John Wiley & Sons. p. 1995-2013, 1981.
- SUH, S.; MORAN, N.; LEE, Y. **Blue light activates depolarization-dependent K channels in flexor cells from *Samanea saman* motor organs via two mechanisms**. Plant Physiol 123: 833–843, 2000.
- TENG, Y.G.; SHIJUN, N.; PENGCHENG, J.; JIAN, D.; CHENGJIANG, Z.; JINSHENG, W. **Eco-environmental geochemistry of heavy metal pollution in Dexing mining area**. Chinese Journal of Geochemistry, 23:349–358, 2004.
- TUPINAMBÁ, G. A. C. **Routine analysis for uranium and thorium by deleyed fission neutrons method**. Thesis – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: UFMG/IPR, 1969.
- UDDIN, S.; BEHBEHANI, M.; ABA A.; Al GHADBAN, A.N. **Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in seawater of the northern Arabian Gulf – Baseline measurements**. Marine Pollution Bulletin, 123: 365–372, 2017.
- UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Radiação, efeitos e fontes**. Disponível em: <http://www.aben.com.br/Arquivos/544/544.pdf>. Acessado em: março de 2018.
- UNSCEAR – UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECT OF ATOMIC RADIATION. **Source and effects of ionizing radiation**. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, New York, 2000.

UNSCEAR – UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **Effects and Risks of Ionizing Radiations**. New York: United Nations, Report to the General Assembly, with Annexes. 1993.

UNSCEAR – UNITED NATIONS. SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **Sources of ionizing radiation**. Report Vol. I. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, 2008.

UNSCEAR – UNITED NATIONS. SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects**. Report to the General Assembly, with annexes. United Nations Publication, United Nations, Thirty-Seventh Session, Supplement No. 45, New York, 1982.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Soil Sampling Quality Assurance User's Guide – EPA 600/8-89/046**. Las Vegas, NV, DC, Environmental Monitoring Systems Laboratory, 1989.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Understanding variation in partition coefficient K_d values. Volume II: Review of Geochemistry and Available K_d values for Cadmium, Cesium, Chromium, Lead, Plutonium, Radon, Strontium, Thorium, Tritium (^3H), and Uranium. Report US EPA 402-R-99-004B**, Washington, DC, 1999.

VALADÃO, R.M.; FRANCHIN, A.G.; JÚNIO, O.M. **A avifauna no Parque Municipal Victorio Siquierolli, zona urbana de Uberlândia, Minas Gerais**. Biotemas, 19:81-91, 2006.

VANDENHOVE, H.; CUYPERS, A.; Van HEES, M.; KOPPEN, G.; WANNIJN, J. **Oxidative stress reactions induced in beans (*Phaseolus vulgaris*) following exposure to uranium**. Plant Physiol Bioch, 44:795-805, 2006.

VANDENHOVE, H.; OLYSLAEGERS, G.; SANZHAROVA, N.; SHUBINA, O.; REED, E.; SHANG, Z.; VELASCO, H. **Proposal for new best estimates of the soil to plant Transfer Factor of U, Th, Ra, Pb and Po**. J. Environ. Radioact. 100:721-732, 2009.

VANHOUDT, N.; VANDENHOVE, H.; SMEETS, K.; REMANS, T.; Van HEES, M.; WANNIJN, J.; VANGRONSWELD, J.; CUYPERS, A. **Effects of uranium and phosphate concentrations on oxidative stress related responses induced in *Arabidopsis Thaliana***. Plant Physiol Bioch, 46:987-996, 2008.

VASCONCELLOS, L. M. H.; AMARAL, E. C. S.; VIANNA, M. E. **Uptake of ^{226}Ra and ^{210}Pb by food crops cultivated in a region of high natural radioactivity in Brazil**. Journal of Environmental Radioactivity, 5: 287-302, 1987.

VASCONCELLOS, L. M. H.; LAURIA, D. C.; SILVA, L. H. C.; TADDEI, J. F. **Relação entre as massas úmida, seca e de cinzas em materiais biológicos – uma ferramenta para amostragens em campo e análise de amostras**. Química Nova, 22:889-893, 1989.

WASSERMAN, M. A. V.; PEREZ, D. V.; LAURIA, D. C. **Cultural inputs of ^{226}Ra and ^{228}Ra in tropical agricultural environments.** Radioprotection – Colloques. Anais do ECORAD 2001, 37:541-545, 2002.

WHICKER, F. W.; SCHULTZ, V. **Radioecology: nuclear energy and the environment.** Boca Raton, Florida, CRC, 1982.

WOLTERBEEK, H.T.H.; KUIK, P.; VERBURG, T.G.; HERPIN, U.; MARKERT, B.; THÖNI, L. **Moss interspecies comparisons in trace element concentrations.** Environmental Monitoring and Assessment, 35:263-286, 1995.

XU, N.; TEN, E. J.; WEI, F. S.; CHEN, L. Q. **Evaluation of Indigenous Concentrations of Uranium and Thorium in Soils of China.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, 24:1795-1803, 1993.

YASUDA, H.; & UCHIDA, S. **Apparent non-linear relationship of radionuclide concentrations between crop and soil.** *In*: Environmental impact of radioactive releases. (Ed. IAEA), p. 259–267, Proc. Int. Symp. on Environ. Impact of Radioactive releases, Vienna, 1995.

YOSHIDA, S.; MURAMATSU, Y.; TAGAMI, K.; UCHIDA, S.; BANNAI, T.; YONEHARA, H.; SAHOO, S. **Concentrations of uranium and $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratios in soil and plant samples collected around the uranium conversion building in the JCO campus.** J. Environ. Radioact. 50:161–172, 2000.

ZAICHICK, V.; TZAPHLIDOU, M. **Determination of calcium, phosphorus, and the calcium/phosphorus ratio in cortical bone from the human femoral neck by neutron activation analysis.** Applied Radiation and Isotopes, 56:781-786, 2002.

**TRABALHOS CIENTÍFICOS
RESULTANTES**



BJRS

BRAZILIAN JOURNAL
OF
RADIATION SCIENCES
XX (XXXX) XX-XX



Análise por ativação neutrônica, método k_0 , aplicada ao monitoramento ambiental de instalação nuclear

Moura^a R. R., Menezes^{a,b*} M. Â. B. C., Silva^a W. F.,

Barreto^{b*} A. A., Carvalho Filho^{b*} C. A

^a *Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Nuclear, Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares*

^b *Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN/CDTN) – *Serviço de Análise e Meio Ambiente (SEAMA)*

Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627 – Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG

rodrigoreismoura@gmail.com

RESUMO

Dentre os agentes tóxicos que podem ser nocivos para o meio ambiente e, conseqüentemente, para saúde humana estão os radionuclídeos, oriundos tanto da natureza quanto de atividades da indústria nuclear. Para o controle de suas concentrações nos compartimentos abióticos e bióticos é necessária a implementação de programas de monitorização sistemático do meio ambiente. Através do monitoramento ambiental, é possível prever o aumento no nível das frações mássicas e das concentrações de atividade dos radionuclídeos das séries naturais do ²³⁸U e ²³²Th ao longo do tempo nas principais matrizes ambientais no entorno de uma instalação nuclear. Isso levou os órgãos reguladores do meio ambiente e nuclear a determinar níveis de atividades que possam causar riscos. Este estudo teve por objetivo avaliar a metodologia de amostragem do programa de monitoramento ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) em dois períodos sazonais (seco e chuvoso), respeitando o ciclo hidrológico de um ano. O CDTN, localizado em Belo Horizonte, Brasil, é uma das três instalações vinculadas à CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) com objetivo de pesquisa e desenvolvimento na área nuclear. Este trabalho apresenta o estudo de plantas e solo oriundos de três pontos de maior interesse radiológico para a instalação. Essas matrizes foram analisadas pela técnica de Ativação Neutrônica, método k_0 . Os resultados mostram que o monitoramento ambiental deve ser realizado em ambos períodos sazonais, pois o solo mostrou-se mais enriquecido pelos elementos de interesse na estação chuvosa e as plantas apresentaram maiores concentrações na estação seca.

Palavras-Chave: Monitoramento Ambiental, Radionuclídeos, Análise por Ativação Neutrônica.

ABSTRACT

Among the toxic agents that can be harmful to the environment and, consequently, to human health are the radionuclides, originating from both the nature and activities of the nuclear industry. For the control of its concentrations in the abiotic and biotic compartments it is necessary to implement programs of systematic monitoring of the environment. Through environmental monitoring, it is possible to predict the increase in the level of the mass fractions and the activity concentrations of the radionuclides of the natural series of ^{238}U and ^{232}Th over time in the main environmental matrices surrounding a nuclear installation. This has led environmental and nuclear regulators to determine levels of risky activities. This study aims to perform the methodology of sampling of the environmental monitoring program of the Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN (Nuclear Technology Development Center) in two seasonal periods (dry and rainy), respecting the hydrological cycle of one year. CDTN, located in the city of Belo Horizonte, Brazil, is one of three institutes sponsored by Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN (Brazilian Commission for Nuclear Energy) dedicated to research and development of the nuclear area. This work is about the study of plants and soil collected from three sampling points of major radiological interest for the installation. These matrices were analysed by the Neutron Activation technique, method k_0 , and the results show that the environmental monitoring should be performed in both dry and rainy seasons, since the soil was more enriched by the elements of interest in the rainy season and the plants had higher concentrations in the dry season.

Keywords: Environmental Monitoring, Radionuclides, Neutron Activation Analysis.

INTRODUÇÃO

O processo de licenciamento de instalações nucleares requer a orientação e o cumprimento de requisitos específicos, embasados na legislação e nas normas dos órgãos responsáveis tanto pela segurança ambiental, IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), quanto nuclear, CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), frente às ações de acompanhamento dos impactos causados por suas atividades no meio ambiente, assim como medidas de controle da qualidade ambiental dentro e no entorno destas instalações [1].

Para a determinação da presença e o controle das frações mássicas e concentrações de atividade do U e Th que compõem o ciclo do combustível nuclear em uma instalação com essa finalidade, cabe ressaltar que: i) a regulamentação para o processo de licenciamento destas instalações fica a cargo da CNEN e está estabelecida na Norma CNEN-NE 1.04 “Licenciamento de Instalações Nucleares” [2]; e ii) às condicionantes legais exigidas pelo IBAMA, mediante a Instrução Normativa nº 1, de 23 de fevereiro de 2015 [3].

As principais ações visam o controle da introdução de radionuclídeos em compartimentos naturais (matrizes abióticas). Isso se deve ao fato de que estes elementos ao se dispersarem no meio ambiente possam, eventualmente, se concentrar em quantidades consideráveis nos organismos vivos (matrizes bióticas) [4]. Pois, uma vez presentes nos compartimentos abióticos do ecossistema, os radionuclídeos podem se concentrar, por exemplo, nas plantas, base da cadeia alimentar, por assimilação destes através do solo ou pela deposição atmosférica [5]. No sistema solo-planta, esses elementos podem ser translocados para as plantas, dependendo da biodisponibilidade dos elementos no solo e da estratégia de absorção das espécies nele presentes [4, 6, 7]. A biodisponibilidade se determina, a partir da quantidade do nutriente que foi absorvido, correlacionando estes resultados com a concentração do elemento nos tecidos vegetais. Assim, um elemento é considerado biodisponível quando encontra-se numa forma química que as plantas são capazes de absorvê-lo [8].

Para atender às exigências da legislação vigente em relação as suas atividades, o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) mantém, desde 1985, um Programa de Monitoramento Ambiental (PMA) de forma a garantir a segurança radiológica e ambiental dentro e no entorno imediato de sua área [9]. A credibilidade desse programa de monitoramento ambiental passa pela confiabilidade na exatidão dos procedimentos adotados nas amostragens e medições realizadas sistematicamente nas suas matrizes ambientais. A aplicação do método

k_0 de Ativação Neutrônica é vantajosa em monitoramentos ambientais pela possibilidade de se determinar todos os elementos na amostra, passíveis de serem ativados sem necessidade de serem analisados padrões dos elementos em estudo [10]. Assim, não só os elementos de interesse serão analisados como todos os outros que, de alguma forma, são importantes sob o ponto de vista ambiental, dentre eles, os radionuclídeos.

Atualmente, o PMA do CDTN realiza a amostragem das matrizes planta e solo uma vez ao ano, na estação chuvosa. Este estudo se propõe a verificar se há influência da sazonalidade para presença de U e Th nos resultados do monitoramento para ambas matrizes. Para isso, foram realizadas duas campanhas de amostragens, respeitando-se o ciclo hidrológico de um ano, ocorrendo uma em um período seco e a outra acontecendo em um período chuvoso.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho constou de execução da amostragem de plantas e solo nos pontos de coleta atuais do PMA realizado pelo CDTN, seguida de preparo, análise e determinação das frações mássicas e da concentração de atividade para U e Th.

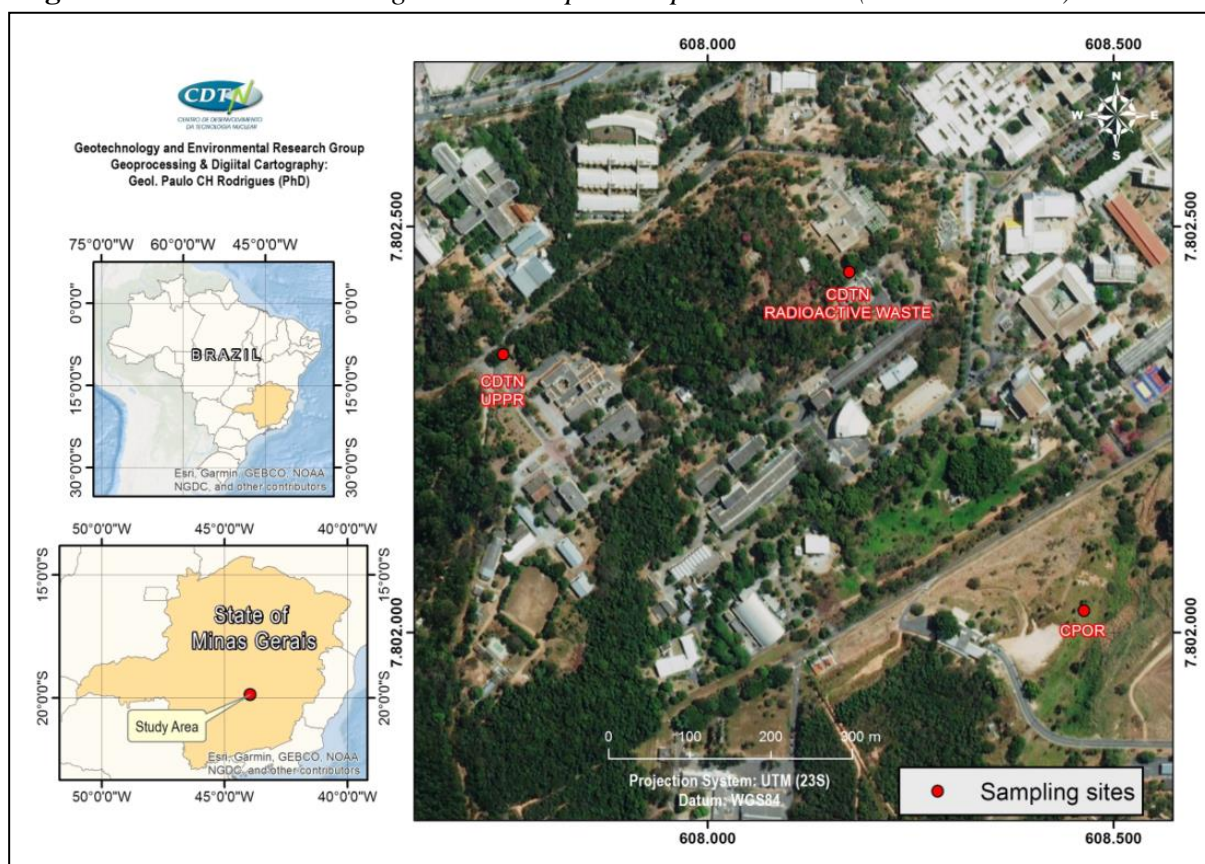
Amostragem

Os pontos de coleta das amostras e os respectivos marcos referenciais e localizações geográficas são apresentados na Tabela 1 e na Figura 1 que foi gerada pelo Núcleo de Pesquisa em Geotecnologias e Modelagem Ambiental (CDTN/SEAMA).

Tabela 1: Localização georreferenciada dos pontos de amostragem do PMA.

Ponto de Coleta	Marco referencial	Coordenada X	Coordenada Y
10/004/001	CPOR	608357,4	7802029
10/004/002	CDTN-1 (UPPR)	607751,6	7802347
10/004/003	CDTN-2 (REJEITO)	607698,8	7801898

CPOR, Centro de Preparação de Oficiais da Reserva; UPPR, Unidade de Pesquisa e Produção de Radiofármacos; REJEITO, Galpão de Rejeito de Baixa Atividade.

Figura 1: Pontos de amostragem do PMA para as plantas e solo (CDTN/SEAMA).

Fonte: Núcleo de Pesquisa em Geotecnologias e Modelagem Ambiental CDTN/SEAMA.

As coletas (34 amostras de plantas e 18 amostras de solo) ocorreram em duas campanhas, respeitando o ciclo hidrológico de um ano (seco e chuvoso). O objetivo foi avaliar as informações presentes no fator sazonalidade em ambas as campanhas.

As plantas foram colhidas manualmente e inteiras (raiz e parte aérea) e nos seus estágios de maior crescimento vegetativo possível, pois elas apresentam melhor estágio nutricional e metabólico, refletindo a composição dos elementos presentes em seu tecido. Foram escolhidas as espécies vegetais de maior representatividade nos pontos – *Brachiaria sp* (Pasto), *Cynodon sp* (Gramínea) e *Epipremnum pinatum* (semi-herbácea), Figuras 2a, 2b e 2c.

Figura 2: Espécies vegetais coletadas no PMA.a) *Brachiaria sp*b) *Cynodon sp*c) *Epipremnum pinatum*

Fonte: Fotografias do autor.

As amostras de solo (Figura 3) foram obtidas em triplicatas na profundidade de 0-20 cm, que corresponde ao ambiente radicular (rizosfera) das plantas amostradas. As amostras foram obtidas em triplicata com auxílio do amostrador do tipo 'liner'.

Figura 3: Amostragem de solo no PMA.



Fonte: Fotografias do autor.

Preparo das amostras

Solo:

As amostras de solo foram secas naturalmente por 2 dias e em seguida secas em estufa durante 2 horas a temperatura de 105 °C. O solo seco foi peneirado em malha de 250 mesh e uma composição ideal da amostra (homogênea) foi obtida a partir do quarteamento. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno (descontaminados) com tampa de rosca, identificadas e tiveram suas massas aferidas em balança de precisão (peso seco). Este preparo seguiu o procedimento descrito na referência IAEA-TECDOC-1360 [11].

Plantas:

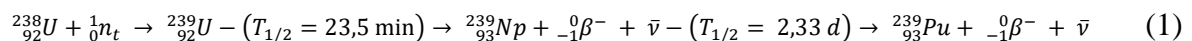
As plantas foram limpas deixando as raízes de molho em bandejas plásticas com água deionizada por 24 horas para facilitar a retirada do solo aderido. Em seguida as plantas foram lavadas em água corrente e deionizada (repetindo o processo 3 vezes) para remoção completa do solo e da poeira. Após a limpeza as amostras foram segmentadas, secas naturalmente por 2 semanas, triturada, colocadas em cadinhos de porcelana de 50 mL (previamente lavados e secos em estufa a 105 °C por 1 hora) e então calcinadas em forno tipo mufla a 600 °C. As amostras, em cinzas, foram pulverizadas com auxílio de um pistilo de porcelana e então, colocadas em frascos de polietileno (identificados) com tampa de rosca.

Análise por ativação neutrônica, método k_0

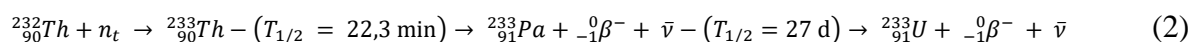
As amostras de plantas e solo juntamente com os correspondentes materiais de referência – GBW 0805, *Tea Leaves* [12] e IAEA-SOIL 7 [13] foram analisadas por Ativação Neutrônica, método k_0 [14], para a determinação da fração mássica e da concentração de atividade de U e de Th.

Foram acondicionados nos seus respectivos porta-amostras de polietileno: as plantas em PA3, porta-amostra com diâmetro interno de 9,6 mm e altura interna de 15 mm, com capacidade de 1 g de amostra e o solo em PA1, diâmetro interno de 9,6 mm e altura interna de 4,3 mm, com capacidade para 200 mg. Em seguida foram colocados em porta-amostras maiores com diâmetro interno de 9,6 mm e altura interna de 75 mm, intercalados por monitores de fluxo de nêutrons – discos de liga de Al Au (0,1%), IRMM-530R [15] com 6 mm de diâmetro e 1 mm de espessura. O porta-amostra maior com as amostras e monitores, por sua vez, foi inserido no "coelho" (20 mm de diâmetro interno e 80 mm de altura interna), porta-amostra de poliestireno e este foi levado para irradiação de 8 horas no reator de pesquisa TRIGA MARK I IPR-R1 do CDTN, que opera a 100 kW com um fluxo de nêutrons térmicos médio na mesa giratória, de $6,30 \times 10^{11}$ nêutrons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e parâmetros espectrais médios f igual a 21,67, e α igual a 0,0026 [14]. Após a irradiação e tempo de espera de decaimento adequados, as amostras e os monitores tiveram seus radionuclídeos induzidos medidos por espectrometria gama (5 dias para o ^{239}Np , 20 dias para o ^{233}Pa e 7 dias para o ^{239}Au) no espectrômetro gama composto de detector HPGe com 50% de eficiência relativa, CANBERRA® (FWHM 1,75 keV) e eletrônica associada. Os espectros foram obtidos com o programa Gennie 2K, CANBERRA® e analisados pelo software HyperLab® V.2009.1. Os cálculos das frações mássicas dos elementos foram executados utilizando o pacote de software Kayzero for Windows® V.2.46, específico para o método. As reações de ativação por nêutrons térmicos estão representadas nas equações 1 e 2, abaixo:

Urânio



Tório



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação de desempenho do laboratório de análise por ativação neutrônica

Como mencionado, o método de análise aplicado foi o método k_0 de ativação neutrônica. Todos os resultados experimentais são expressos com a incerteza combinada padrão (“Combined Standard Uncertainty” [$k = 1$]) de acordo com o GUM [16]. Os resultados obtidos experimentalmente para U e Th nos materiais de referência são apresentados na Tabela 2. Os valores de E_n -score [17] são menores do que 1, indicando que o desempenho do laboratório em aplicar o método k_0 está satisfatório.

Tabela 2: Resultados experimentais e valores recomendados dos materiais de referência.

El.	GBW0805 (Tea leaves)			IAEA-SOIL 7		
	Resultados Experimentais, $k = 1$ (mg kg ⁻¹)	Valores Recomendados, $k = 2$ (mg kg ⁻¹)	E_n -score	Resultados Experimentais, $k = 1$ (mg kg ⁻¹)	Valores Recomendados, $k = 2$ (mg kg ⁻¹)	E_n -score
Th	0,111 ± 0,003	0,105 ± 0,013	0,45	8,1 ± 0,3	8,2 ± 0,5	0,32
U	< 2	NR	-	2,4 ± 0,1	2,4 ± 0,35	0,74

EL., Elemento; <, Menor do Que; NR, Não Reportado.

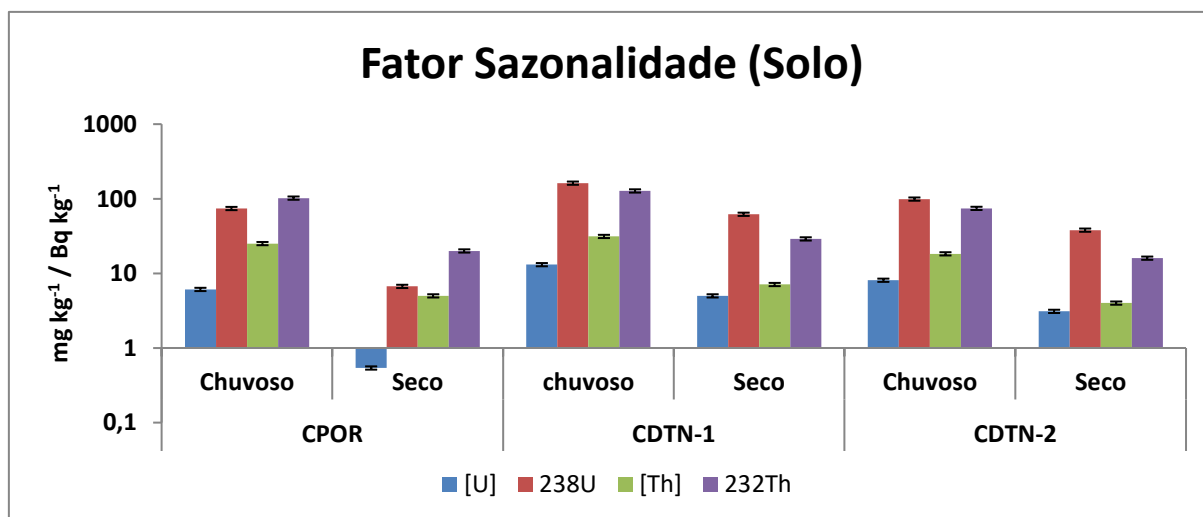
Avaliação do fator sazonalidade

Solo:

A análise das amostras do solo realizada em períodos distintos dentro de um ano hidrológico mostra que há uma maior biodisponibilidade dos elementos de interesse na estação chuvosa que no período de estiagem (Tabela 3 e Figura 3). Isto porque a fração coloidal do solo apresenta uma química intensa e por isso, apresenta grande afinidade pela água e conseqüentemente pelos elementos nela dissolvidos. Por este motivo, talvez, seja importante para o monitoramento ambiental, a verificação do comportamento distinto na disponibilidade de elementos químicos no solo. Na estação seca, é provável que essas frações coloidais quimicamente ativas fiquem mais restritas a solos naturalmente úmidos.

Tabela 3: Avaliação da sazonalidade nas frações mássicas e nas concentrações de atividade nos solos dos Pontos de Coleta do PMA.

Ponto de Coleta	CHUVOSO [k = 1]				SECO [k = 1]			
	[U] (mg kg ⁻¹)	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹)	[Th] (mg kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	[U] (mg kg ⁻¹)	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹)	[Th] (mg kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)
CPOR	6,0±0,2	74±3	25±1	102±4	0,54±0,02	6,7±0,2	5,0±0,4	20±2
CDTN-1	13,1±0,5	162±6	31±1	127±5	5,0±0,2	62±3	7,1±0,5	29±2
CDTN-2	8,0±0,4	99±5	18±1	74±3	3,1±0,1	38±1	4±1	16±2

Figura 3: Avaliação da sazonalidade do U e Th nas frações mássicas e nas concentrações de atividade de atividade no solo dos Pontos de Coleta do PMA.

Observa-se que os solos amostrados para análise no PMA e, consequentemente neste estudo, são do tipo arenoso. Por isso, uma razão dos valores baixos observados na estação seca é que esses valores estejam refletindo essas características. Contudo, os resultados apresentados neste estudo para a estação seca não podem ser desconsiderados, pois são significativos, sobretudo para o Th.

Plantas:

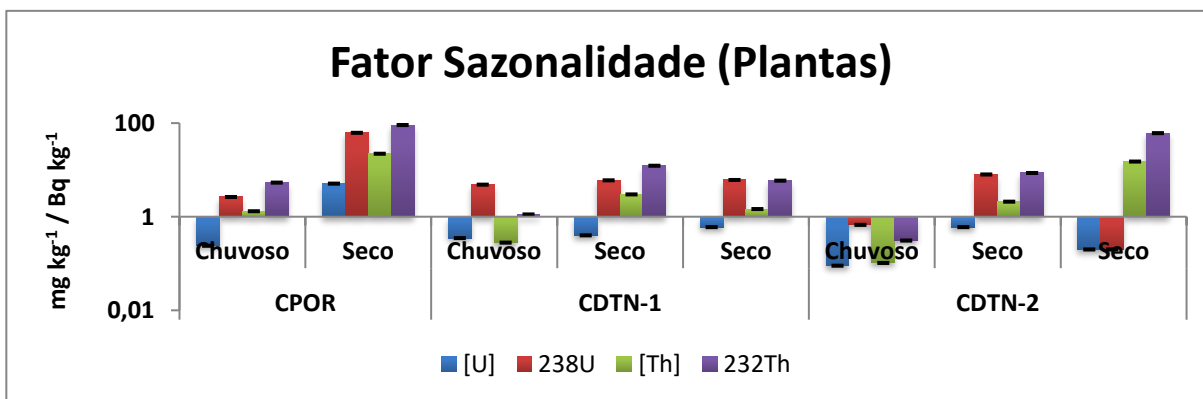
De forma contrária ao ocorrido com o solo, nas plantas as concentrações de atividade para U e Th mostraram-se maiores no período de estiagem em relação à estação de chuva (Tabela 4 e Figura 4). É bem conhecido que as concentrações de elementos nos tecidos vegetais podem variar com o tempo, por exemplo, durante a estação de vegetação [18]. Essas variações nas

frações mássicas e concentrações de atividade de determinados elementos pelas plantas ao longo de uma estação pode ser dado pelo tempo – dias ou até horas [19, 20, 21, 22]. Essas variações podem ser controladas pela luminosidade que é mais intensa na estação seca. É possível supor que pode haver influência sobre a taxa fotossintética ou a capacidade respiratória de espécies em particular.

Tabela 4: Avaliação da sazonalidade nas frações mássicas e nas concentrações de atividade nas plantas dos Pontos de Coleta do PMA.

Ponto de Coleta	CHUVOSO [k = 1]				SECO [k = 1]			
	[U] (mg kg ⁻¹)	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹)	[Th] (mg kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	[U] (mg kg ⁻¹)	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹)	[Th] (mg kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)
CPOR	0,21±0,03	2,6±0,4	1,3±0,04	5,4±0,2	5,0±0,2	62±3	22±1	91±4
CDTN-1	0,3±0,1	4±1	0,30±0,01	1,1±0,1	1±1	11±7	4,5±0,2	18±1
CDTN-2	0,05±0,01	0,7±0,1	0,06±0,01	0,31±0,02	0,6±0,3	7±2	17±1	70±2

Figura 4: Avaliação da sazonalidade na capacidade de absorção das plantas coletadas nos Pontos de Coleta do PMA.



CONCLUSÕES

A amostragem de plantas e de solo no Programa de Monitoramento Ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) ocorre uma vez por ano, na estação chuvosa. Visando, então verificar se há influência da sazonalidade, foram realizadas coletas de ambas as matrizes nas estações chuvosa e seca.

Os resultados para sazonalidade indicaram que o período chuvoso é favorável para o solo e o período seco, favorável para as plantas. Assim, este estudo sugere que o monitoramento ambiental deve ser realizado em ambos os períodos sazonais (seco e chuvoso), pois o solo

mostrou-se mais enriquecido pelos elementos de interesse na estação chuvosa e as plantas apresentaram maiores concentrações na estação seca.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às respectivas instituições – UFMG, CDTN, FAPEMIG, CNPq e CAPES – pelo apoio técnico e financeiro para o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] ARAÚJO, S. M. V. G. **Licenciamento Ambiental e Legislação**, Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Disponível na página: <http://bd.camara.gov.br>. Acessado em: 21/04/2017.
- [2] CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **CNEN-NE 1.04: Estabelece o Licenciamento de Instalações Nucleares (Resolução CNEN 15/02)**, Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm104.pdf>. Acessado em: 21/04/2017.
- [3] BRASIL, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Instrução Normativa N° 1, de 23 de fevereiro de 2015/IBAMA**, Disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=24/02/2016&jornal=1&pagina=59&totalArquivos=176>. Acessado em: 21/04/2017.
- [4] FERREIRA, E. G. **Programa de monitoração ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear**, DERL.PD 022/85, Belo Horizonte: CDTN (1985).
- [5] EISENBUD, M. **Environmental radioactivity**, 3rd. ed, New York, Academic, (1987).
- [6] IAEA – International Atomic Energy Agency, **Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment**, Vienna, 2001, IAEA-Safety Reports Series 19 (2001).

- [7] WHICKER, F. W.; SCHULTZ, V. **Radioecology: nuclear energy and the environment**, Boca Raton, Florida, CRC (1982).
- [8] COZZOLINO, S. M. F. **Biodisponibilidade de minerais**, R. Nutr. Campinas, 10(2): 87-98, jul/dez (1997).
- [9] REIS, R. G., **NORM: Guia Prático**, Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), 1st. ed, Rio de Janeiro, 236 p., (2016).
- [10] BODE, P.; GREENBERG, R.R.; FERNANDES, E.A.N. **Activation analysis: a primary (ratio) method to determine SI-Traceable values of elements content in complex samples**. *Chimia, Metrology in Chemistry*, v.63, p.678-680, (2009).
- [11] IAEA – International Atomic Energy Agency, **Collection and Preparation of Bottom Sediment Samples for Analysis of Radionuclides and Trace Elements**, IAEA-TECDOC-1360. Vienna (2003).
- [12] NRCRM – National Research Centre for CRM, **Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Components. “Certified Reference Material, GBW 0805, Tea Leaves**. Langfang, China, (1987).
- [13] IAEA- – International Atomic Energy Agency, **Certified Reference Material – IAEA SOIL-7**, Trace elements in soil, Viena, Austria, (2000).
- [14] MENEZES, M. Â. B. C.; JACIMOVIĆ, R. **Optimised k_0 -instrumental neutron activation method using the TRIGA MARK I IPR-R1 reactor at CDTN/CNEN, Belo Horizonte Brazil**, *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research*, Vol. 564, pp. 707-715 (2006).
- [15] IRRM – Institute for Reference Materials and Measurements, **Certificate of analysis: certified reference material IRMM-530R**, Geel: (gold mass fraction in Al-(0.1%) Au Alloy) (2002).

- [16] INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, **Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**, Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 141 p. (2012).
- [17] ISO – International Standard Organization, **ISO 13528: Statistical methods for use in a proficiency testing by interlaboratory comparisons**. ISO: Geneva (2005)
- [18] MYUNG, C. J.; THORNTON, I. **Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb–Zn mine in Korea**, Sci Tot Environ Vol. 198, pp. 105–121 (1987)
- [19] CARTER, P. J.; NIMMO, H. G.; FEWSON, C. A.; WILKINS, M. B. **Circadian rhythms in the activity of a plant protein kinase**. EMBO J Vol. 10, pp. 2063–2068 (1991).
- [20] BEHRENFELD, M. J.; PRASIL, O.; BABIN, M.; BRUYANT, F. **In search of a physiological basis for covariations in light-limited and light-saturated photosynthesis**, J Phycol Vol. 40, pp. 4–25 (2004).
- [21] KIM, H. Y.; COTÉ, G. G.; CRAIN, R. C. **Effects of light on the membrane potential of protoplasts from *Samanea saman pulvini***, Involvement of the H-ATPase and K channels. Plant Physiol Vol. 99, pp. 1532–1539 (1992).
- [22] KIM, H. Y.; COTÉ, G. G.; CRAIN, R. C. **Potassium channels in *Samanea saman* protoplasts controlled by phytochrome and the biological clock**, Science Vol. 260, pp. 960–962 (1993).



ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA, MÉTODO k_0 , APLICADA AO MONITORAMENTO AMBIENTAL DE INSTALAÇÃO NUCLEAR

Rodrigo Reis de Moura¹, Maria Ângela de Barros Correia Menezes^{1,2*}, Wellington Ferrari da Silva¹, Alberto Avellar Barreto^{2}, Carlos Alberto de Carvalho Filho^{2**}**

¹Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Nuclear
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

²Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN)
*Serviço de Técnicas Analíticas (SERTA), **Serviço de Meio Ambiente (SEMAM)

Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 – Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG

rodrigoreismoura@gmail.com

Palavras-Chave: Monitoramento Ambiental, Radionuclídeos, Ativação Neutrônica

RESUMO

Dentre os agentes tóxicos que podem ser nocivos para o meio ambiente e, conseqüentemente, para saúde humana estão os radionuclídeos, oriundos tanto da natureza quanto de atividades da indústria nuclear. Para o controle de suas concentrações nos compartimentos abióticos e bióticos é necessária a implementação de programas de monitoramento sistemático do meio ambiente. Através do monitoramento ambiental, é possível prever o aumento no nível das frações mássicas e das concentrações de atividade dos radionuclídeos das séries naturais do ^{238}U e ^{232}Th ao longo do tempo nas principais matrizes ambientais no entorno de uma instalação nuclear. Isso levou os órgãos reguladores do meio ambiente e nuclear a determinar níveis de atividades que possam causar riscos. Este estudo tem por objetivo executar a metodologia de amostragem do programa de monitoramento ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear em dois períodos sazonais (seco e chuvoso), respeitando o ciclo hidrológico de um ano. O CDTN, localizado na cidade de Belo Horizonte, Brasil, é uma das três instalações, vinculadas à CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) com intuito de pesquisa e desenvolvimento na área nuclear. Este trabalho é sobre o estudo de plantas oriundas de três pontos de maior interesse radiológico para a instalação. Essa matriz foi analisada pela técnica de Ativação Neutrônica, método k_0 e os resultados mostram que o monitoramento ambiental deve ser realizado em ambos períodos sazonais (seco e chuvoso). No entanto, as plantas apresentaram maiores concentrações na estação seca.

1. INTRODUÇÃO

O processo de licenciamento de instalações nucleares requer a orientação e o cumprimento de requisitos específicos, embasados na legislação e nas normas dos órgãos responsáveis tanto pela segurança ambiental, IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), quanto nuclear, CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), frente às ações de acompanhamento dos impactos causados por suas atividades no meio ambiente, assim como medidas de controle da qualidade ambiental dentro e no entorno destas instalações [1].



Para a determinação da presença e o controle das frações mássicas e concentrações de atividade do U e Th que compõem o ciclo do combustível nuclear em uma instalação com essa finalidade, cabe ressaltar que: i) a regulamentação para o processo de licenciamento destas instalações fica a cargo da CNEN e está estabelecida na Norma CNEN-NE 1.04 “Licenciamento de Instalações Nucleares” [2]; e ii) às condicionantes legais exigidas pelo IBAMA, mediante a Instrução Normativa n° 1, de 23 de fevereiro de 2015 [3].

Para atender às exigências da legislação vigente em relação as suas atividades, o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) mantém, desde 1985, um Programa de Monitoramento Ambiental (PMA) de forma a garantir a segurança radiológica e ambiental dentro e no entorno imediato de sua área [3]. A credibilidade desse programa de monitoramento ambiental passa pela exatidão dos procedimentos adotados nas amostragens e medições realizadas sistematicamente nas suas matrizes ambientais.

Atualmente, o PMA do CDTN realiza a amostragem da matriz plantas uma vez ao ano, na estação chuvosa. Este estudo se propõe a verificar se há influência da sazonalidade para presença de U e Th nos resultados do monitoramento para matriz planta. Para isso, foram realizadas duas campanhas de amostragens dessa matriz, respeitando-se o ciclo hidrológico de um ano, ocorrendo uma em um período seco e a outra acontecendo em um período chuvoso.

2. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho constou de execução da amostragem de plantas nos pontos de coleta atuais do PMA realizado pelo CDTN, seguida de preparo, análise e determinação das frações mássicas e da concentração de atividade para U e Th.

2.1. Amostragem

Os pontos de coleta das amostras e os respectivos marcos referenciais e localizações geográficas são apresentados na Tab.1 e Fig.1.

Tab. 1. Localização georreferenciada dos pontos de amostragem do PMA.

Ponto de Coleta	Marco referencial	Coordenada X	Coordenada Y
10/004/001	CPOR	608357,4	7802029
10/004/002	CDTN-1 (UPPR)	607751,6	7802347
10/004/003	CDTN-2 (REJEITO)	607698,8	7801898

CPOR, Centro de Preparação de Oficiais da Reserva; UPPR, Unidade de Pesquisa e Produção de Radiofármacos; REJEITO, Galpão de Rejeito de baixa atividade.

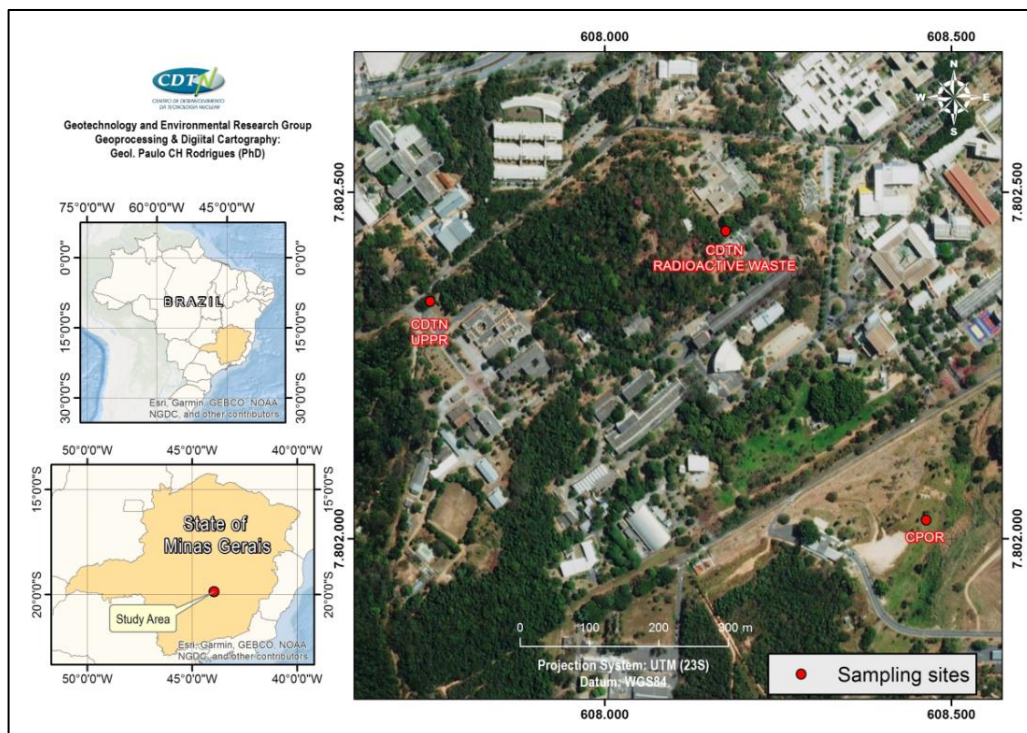


Fig. 1. Pontos de amostragem do PMA para as plantas.

As coletas (34 amostras de plantas) ocorreram em duas campanhas, respeitando o ciclo hidrológico de um ano (seco e chuvoso). O objetivo foi avaliar as informações presentes no fator sazonalidade em ambas as campanhas.

As plantas foram colhidas manualmente e inteiras (raiz e parte aérea) e nos seus estágios de maior crescimento vegetativo possível, pois elas apresentam melhor estágio nutricional e metabólico, refletindo a composição dos elementos presentes em seu tecido. Foram escolhidas as espécies vegetais de maior representatividade nos pontos – *Brachiaria sp* (Pasto), *Cynodon sp* (Gramínea) e *Epipremnum pinatum* (semi-herbácea).

2.2. Preparo das amostras

As plantas foram limpas deixando as raízes de molho em bandejas plásticas com água deionizada por 24 horas para facilitar a retirada do solo aderido. Em seguida as plantas foram lavadas em água corrente e deionizada (repetindo o processo 3 vezes) para remoção completa do solo e da poeira. Após a limpeza as amostras foram segmentadas, secas naturalmente por 2 semanas, triturada, colocadas em cadinhos de porcelana de 50 mL (previamente lavados e secos em estufa a 105 °C por 1 hora) e então calcinadas em forno tipo mufla a 600 °C. As amostras, em cinzas, foram pulverizadas com auxílio de um pistilo de porcelana e então, colocadas em frascos de polietileno (identificados) com tampa de rosca.



2.3. Análise por Ativação Neutrônica, método k_0

As amostras de plantas juntamente com o material de referência – GBW 0805, *Tea Leaves* [4] foram analisadas por Ativação Neutrônica, método k_0 , para a determinação da fração mássica e da concentração de atividade de U e de Th.

Foram acondicionados nos seus respectivos porta-amostras, as plantas em PA3, com capacidade de 1 g de amostra. Em seguida foram colocados em porta-amostras maiores, intercalados por monitores de fluxo de nêutrons – discos de liga de Al Au (0,1%), IRMM-530R [5]. Os porta amostras foram inseridos em outro denominado de "coelho" e levados para irradiação de 8 horas no reator de pesquisa TRIGA MARK I IPR-R1 do CDTN, que opera a 100 kW de potência com um fluxo de nêutrons na posição de irradiação PI-7 na mesa giratória, de $6,35 \times 10^{11}$ nêutrons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e parâmetros espectrais f igual a 22,32, e α igual a -0,0022 [6]. Após a irradiação e tempo de espera de decaimento adequados, as amostras e os monitores tiveram seus radionuclídeos induzidos medidos por espectrometria gama, no detector HPGe com 50% de eficiência relativa, CANBERRA® (FWHM 1,75 keV). Os espectros foram obtidos com o programa Gennie 2K, CANBERRA e analisados pelo software HyperLab® V.2009.1. Os cálculos das frações mássicas dos elementos foram executados utilizando o pacote de software Kayzero for Windows® V.2.46, específico para o método. As reações de ativação por nêutrons térmicos foram as seguintes:

Urânio

$^{238}\text{U} + n_t \rightarrow ^{239}\text{U} + \beta + \gamma$ (23,5 minutos de meia vida) $\rightarrow ^{239}\text{Np} + \beta + \gamma$ (228,1 keV (10,72%) e 277,6 keV (14,1%), 2,35 dias de meia vida)

Tório

$^{232}\text{Th} + n_t \rightarrow ^{233}\text{Th} + \beta + \gamma$ (22,3 minutos de meia vida) $\rightarrow ^{233}\text{Pa} + \beta + \gamma$ (312,0 keV (33,7%), 27 dias de meia vida)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação de desempenho do Laboratório de Análise por Ativação Neutrônica

Os resultados obtidos experimentalmente para U e Th nos materiais de referência são apresentados na Tab. 2. Os valores de E_n -score [7] são menores do que 1, indicando que o desempenho do laboratório em aplicar o método k_0 está satisfatório.

Tab. 2. Resultados experimentais e valores recomendados dos materiais de referência.

El.	GBW0805 (Tea leaves)		
	Resultados Experimentais (mg kg^{-1})	Valores Recomendados (mg kg^{-1})	E_n -score
Th	$0,111 \pm 0,003$	$0,105 \pm 0,013$	0,45
U	< 2	NR	-

EL., Elemento; <, Menor do Que; NR, Não Reportado



3.2. Avaliação do Fator Sazonalidade

As concentrações de atividade para U e Th nas plantas se mostraram maiores no período de estiagem em relação à estação de chuva (Tab. 3 e Fig. 2). É bem conhecido que as concentrações de elementos nos tecidos vegetais podem variar com o tempo, por exemplo, durante a estação de vegetação [8]. Essas variações nas frações mássicas e concentrações de atividade de determinados elementos pelas plantas ao longo de uma estação pode ser dado pelo tempo – dias ou até horas [9, 10, 11, 12].

Essas variações podem ser controladas pela luminosidade que é mais intensa na estação seca. É possível supor que pode haver influência sobre a taxa fotossintética ou a capacidade respiratória de espécies em particular.

Tab.4. Avaliação da sazonalidade na capacidade de absorção das plantas coletadas nos Pontos de Coleta do PMA.

PONTO DE COLETA	CHUVOSO				SECO			
	[U] (mg kg ⁻¹)	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹)	[Th] (mg kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	[U] (mg kg ⁻¹)	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹)	[Th] (mg kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)
CPOR	0,21±0,03	2,6±0,4	1,3±0,04	5,4±0,2	5,0±0,2	62±3	22±1	91±4
CDTN-1	0,3±0,1	4±1	0,30±0,01	1,1±0,1	1±1	11±7	4,5±0,2	18±1
CDTN-2	0,05±0,01	0,7±0,1	0,06±0,01	0,31±0,02	0,6±0,3	7±2	17±1	70±2

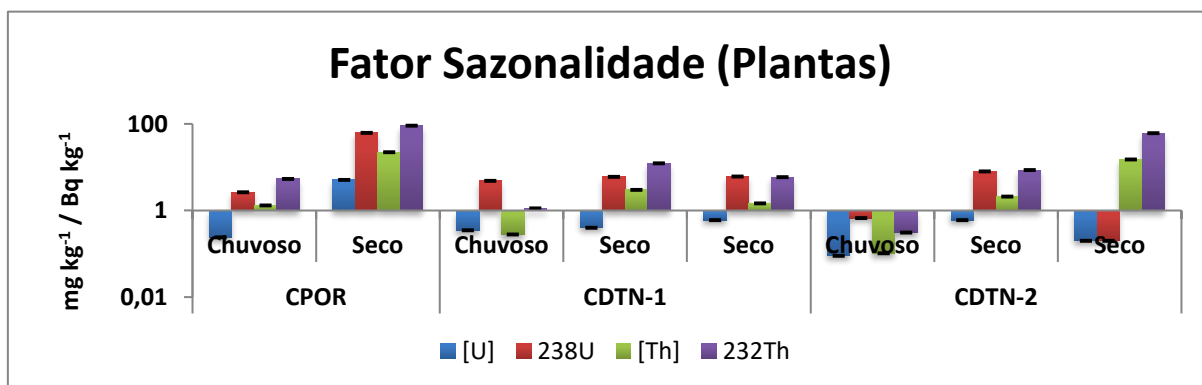


Fig.2. Avaliação da sazonalidade na capacidade de absorção das plantas coletadas nos Pontos de Coleta do PMA.

4. CONCLUSÃO

Em relação à amostragem da matriz ambiental (planta), os resultados para sazonalidade mostram-se ideais nos dois períodos: No entanto, o período seco mostrou-se mais favorável para as plantas.



AGRADECIMENTOS

Agradecemos às respectivas instituições – UFMG, CDTN, FAPEMIG, CNPq e CAPES – pelo apoio técnico e financeiro para o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. M. V. G. Araújo, “Licenciamento Ambiental e Legislação”, Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Disponível na página: <http://bd.camara.gov.br>. Acessado em: 21/04/2017.
- [2] CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear, “CNEN-NE 1.04: Estabelece o Licenciamento de Instalações Nucleares (Resolução CNEN 15/02)”, Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm104.pdf>. Acessado em: 21/04/2017.
- [3] E. G. Ferreira, “Programa de monitoração ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear”, DERL.PD 022/85, Belo Horizonte: CDTN (1985).
- [4] NRCRM – National Research Centre for CRM, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Components. “Certified Reference Material”, GBW 0805, Tea Leaves. Langfang, China, (1987).
- [5] IRRM – Institute for Reference Materials and Measurements, “Certificate of analysis: certified reference material IRMM-530R”, Geel: (gold mass fraction in Al-(0.1%) Au Alloy) (2002).
- [6] M. Â. B. C. Menezes e R. Jaćimović, “Optimised *ko*-instrumental neutron activation method using the TRIGA MARK I IPR-R1 reactor at CDTN/CNEN, Belo Horizonte Brazil”, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, Vol. 564, pp. 707-715 (2006).
- [7] International Standard Organization – ISO. “ISO 13528: Statistical methods for use in a proficiency testing by interlaboratory comparisons”. ISO: Geneva (2005).
- [8] C. J. Myung e I. Thornton, “Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb–Zn mine in Korea”, Sci Tot Environ Vol. 198, pp. 105–121 (1987).
- [9] P. J. Carter et al, “*Circadian rhythms* in the activity of a plant protein kinase”. EMBO J Vol. 10, pp. 2063–2068 (1991).
- [10] M. J. Behrenfeld et al, “In search of a physiological basis for covariations in light-limited and lightsaturated photosynthesis”, J Phycol Vol. 40, pp. 4–25 (2004).
- [11] H. Y. Kim et al, “Effects of light on the membrane potential of protoplasts from *Samanea saman pulvini*”, Involvement of the H-ATPase and K channels. Plant Physiol Vol. 99, pp. 1532–1539 (1992).
- [12] H. Y. Kim et al, “Potassium channels in *Samanea saman* protoplasts controlled by phytochrome and the biological clock”, Science Vol. 260, pp. 960–962 (1993).



Quarta Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações
Belo Horizonte, 6 a 8 de novembro de 2018
Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais

CERTIFICADO

*Certificamos que **Rodrigo Reis de Moura** participou da IV SENCIR ocorrida entre os dias 6 e 8 de novembro de 2018 em Belo Horizonte e organizada pelo Departamento de Engenharia Nuclear e pelo Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Universidade Federal de Minas Gerais, tendo apresentado o trabalho ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA, MÉTODO k_0 , APLICADA AO MONITORAMENTO AMBIENTAL DE INSTALAÇÃO NUCLEAR de autoria de Rodrigo Reis de Moura, Maria Ângela de Barros Correia Menezes, Wellington Ferrari da Silva, Alberto Avellar Barreto, Carlos Alberto de Carvalho Filho, na Sessão de Pôsteres em 07/11/2018.*

Premiação: Trabalho classificado como DESTAQUE na categoria “Doutorado” na Sessão de Pôsteres.

Antonella Lombardi Costa
Chefe do Dep. de Eng. Nuclear da UFMG
Coordenadora Geral da IV SENCIR

Clarysson Alberto Mello da Silva
Coordenador do Programa de Pós-graduação em
Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG

Nº do registro: AR-009 em 12/11/2018



ATUALIZAÇÃO DE METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL EM INSTALAÇÃO RADIATIVA E NUCLEAR NO BRASIL

Moura, Rodrigo Reis^{1,2*}, Menezes, Maria Ângela de Barros Correia^{1,2*}, Silva, Wellington Ferrari^{1,2*}, Barreto, Alberto Avellar^{2**}, Carvalho Filho, Carlos Alberto^{2**}, Fleming, Peter Marshall^{2**},

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Nuclear, Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Brasil – rodrigoreismoura@gmail.com

²Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) / Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), *Serviços de Técnicas Analíticas (SERTA) e **Serviços de Meio Ambiente (SEMAM), Brasil – rodrigoreismoura@gmail.com

Palabras clave: Monitoramento Ambiental, Licenciamento Ambiental, Ativação Neutrônica.

Monitoramento Ambiental consiste em ser um elemento básico de planejamento, saneamento e gerenciamento do meio ambiente frente à operação de um empreendimento, cujas atividades podem ser potencialmente impactantes para ele. A indústria nuclear, por exemplo, tem suas atividades conduzidas dentro de critérios e normas específicas com intuito de garantir sua licença de operação [1].

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) – com sede em Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil – é uma instalação classificada como radiativa/nuclear que desenvolve desde 1985 um Programa de Monitoramento Ambiental (PMA) da sua área e regiões circunvizinhas. Este programa consiste da amostragem e análise das matrizes ambientais nela presentes (ar, água, solo e planta), de forma a atender às condicionantes legais exigidas pelos órgãos reguladores nacional do meio ambiente, IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), e nuclear, CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) [2].

O objetivo deste trabalho é reavaliar este programa de monitoramento ambiental de forma a atualizar sua metodologia de amostragem e análise dos compartimentos solo (abiótico) e planta (biótico) para a determinação da presença dos radionuclídeos das séries naturais do ²³²Th e ²³⁸U.

As plantas utilizadas neste trabalho foram amostradas manualmente completas (raiz e parte aérea) e o solo em profundidade (0 – 30 cm), utilizando-se de amostrador do tipo *Liner*. Após preparação adequada de cada matriz, as mesmas tiveram as suas concentrações elementares determinadas por ativação neutrônica, método *k₀*. Trata-se de uma técnica estabelecida em 1995 no CDTN que utiliza uma fonte de nêutrons (reator de pesquisa),

espectrômetros gama compostos de detectores de HPGe associados a eletrônica específica e *softwares* de última geração que juntamente à mão-de-obra qualificada garantem uma alta precisão e exatidão dos resultados alcançados [3].

Os resultados obtidos sugerem que a metodologia aplicada no PMA até o momento, deve ser otimizada de forma a atender melhor às exigências da legislação vigente.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio financeiro e técnico-científico às respectivas instituições – CAPES, FAPEMIG, CNPq, UFMG e CDTN.



Referências

1. CNEN-NEA 1.04, Resolução CNEN – Licenciamento de Instalações Nucleares. Disponível em: <http://appasp.cnem.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm104.pdf>. Acessado em: 21/04/2017.
2. IBAMA, Instrução Normativa N°1, de 23 de fevereiro de 2015. Disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=24/02/2016&jornal=1&pagina=59&totalArquivos=176>. Acessado em: 21/04/2017.
3. M.Â.B.C. Menezes, R. Jacimovic, Implem. of a methodol. to analyse cylindrical 5-g sample by neutron activation technique, *k₀*-method, at CDTN/CNEN, Belo Horizonte, Brazil. *Radioanal. Nucl. Chem*, v. 300, p. 523-531, 2014.



XIII LASEAC
LATIN AMERICAN SYMPOSIUM ON
ENVIRONMENTAL & ANALYTICAL CHEMISTRY



XIV ENCUENTRO DE QUÍMICA ANALÍTICA Y AMBIENTAL
DIVISIÓN DE QUÍMICA ANALÍTICA Y AMBIENTAL
SOCIEDAD CHILENA DE QUÍMICA

12 -15 noviembre 2018 • Hotel La Bahía Enjoy • La Serena • Chile

Santiago de Chile, 4 de julio, 2018

Estimado Rodrigo Reis de Moura,

En nombre del Comité Científico del XIII Simposio Latinoamericano de Química Analítica y Ambiental, y el XIV Encuentro de Química Analítica y Ambiental 2018, me complace informarle que, de acuerdo a su solicitud, su trabajo "Atualização de Metodologia para Monitoramento Ambiental em Instalação Radiativa e Nuclear no Brasil" ha sido aceptado para su presentación en modalidad oral.

Sin otro particular, le saluda atentamente,

Dr. Alejandro Álvarez Lueje
Presidente Comité Científico

**LA FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y
FARMACÉUTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE
CHILE Y EL COMITÉ ORGANIZADOR
CERTIFICAN QUE:**

Rodrigo Reis Moura

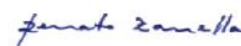
Presentó el trabajo oral “Atualização de metodologia para monitoramento ambiental em instalação radiativa e nuclear no Brasil.”, de los autores Moura, R.R., Menezes, M.Â. de Barros Correia, Silva, W. F., Barreto, A.A., Carvalho Filho, C.A., Fleming, P.M. en el XIII SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA ANALÍTICA y AMBIENTAL (XIII LASEAC) y XIV ENCUENTRO DE QUÍMICA ANALÍTICA Y AMBIENTAL (XIV EQAA).



Pablo Richter
Presidente Comité Organizador



Edwar Fuentes
Presidente División
Q. Analítica y ambiental



Renato Zanella
Presidente RACAL

AEC P-11

**NUCLEAR TECHNOLOGY DEVELOPMENT CENTRE, BELO HORIZONTE,
BRAZIL: ENVIRONMENTAL MONITORING PROGRAM**

Rodrigo Reis de Moura¹, Maria Angela de B. C. Menezes², Wellington Ferrari da Silva¹, Igor Felipe Silva Moura¹, Vinícius Verna Magalhães Ferreira³, Alberto Avellar Barreto³

e-mail: rodrigoreismoura@gmail.com

¹Federal University of Minas Gerais (UFMG) and Nuclear Technology Development Center, Brazilian Commission for Nuclear Energy (CDTN/CNEN), Program for Postgraduation in Sciences and Nuclear Techniques (PCTN) and Division for Analytical Techniques, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

²Nuclear Technology Development Center, Brazilian Commission for Nuclear Energy (CDTN/CNEN) and Federal University of Minas Gerais (UFMG), Division for Analytical Techniques, Laboratory for Neutron Activation Analysis and Program for Postgraduation in Sciences and Nuclear Techniques (PCTN), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

³Nuclear Technology Development Center, Brazilian Commission for Nuclear Energy (CDTN/CNEN), Division for Environment, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

Several activities are carried out by CDTN' departments - Nuclear Technology Development Centre, an institution located at Belo Horizonte city, the capital of Minas Gerais, a Brazilian State. Diversified liquid effluents, radioactive and non-radioactive waste can be generated by the activities carried out. Due to this, there are several potential sources of environmental contamination. These sources should be monitored and controlled otherwise they may cause direct and indirect risks to man and the environment. Due to these risks, the Environmental Monitoring Program (EMP) has been operating since 1985, aiming at evaluating and controlling the installations' operating conditions. The impact caused by release of stable and radioactive elements on the surrounding environment is, then, continuously evaluated. The EMP for radioactive and nuclear installations is based on Regulatory Position 3.01/008 "Environmental Radiological Monitoring Program" [1] from the Brazilian Nuclear Energy Commission that establishes the main requirements for development of an operational EMP.

CDTN's EMP includes sampling of liquid effluent, particulate airborne matter, soil, vegetation, surface water, sediment, and groundwater and radionuclides are determined in these samples. Besides data collecting, a continuous and systematic follow up process of environmental variables should be done as well as to qualitatively and quantitatively identify and evaluate the conditions of natural resources at a specified moment and the tendency over time. In 2002, the institute received IBAMA (Brazilian Environmental and Water Resource Institute) [2] Environmental Operation License. From this time on, other parameters started to be monitored by law.

According to legislation, chemical analyses include determination of gross alpha and gross beta activities, concentration of activities of the natural radioactive elements ⁴⁰K, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²³⁸U, and ²³²Th, concentration of oil and grease, ammonia, barium, cadmium, copper, total chromium, hexavalent chromium, mercury, silver, and nickel, as well as physical-chemical parameters, pH, temperature, and conductivity. Analytical methods applied depend on the analyte and matrix and techniques as AAA, ICPMS, HPLC. Radioactive elements are measured by neutron activation analysis, gamma spectrometry and liquid scintillation.

This work shows that the results are in good agreement with Brazilian legislation pointing out that the EMP is an efficient tool to prove that the CDTN's activities are not contaminating the environment.

References:

[1] Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). *Programa de Monitoração Radiológica Ambiental*. Rio de Janeiro (2006). Posição Regulatória 3.01/008.; [2] Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (Brazilian Institute for Environment and Renewable Natural Resources) <http://www.ibama.gov.br/institucional/> Accessed 26 May 2018.

Acknowledgements: The authors thank CNPq, CAPES, and FAPEMIG for financial support. CDTN is the only Brazilian nuclear research institute that has obtained an Environmental Operating License from IBAMA.

Keywords: environment monitoring, radionuclides, analytical techniques.



25th Congress of the Society of Chemists and Technologists of Macedonia

25^{TI} Конгрес на хемичарите и технолозите на Македонија

Ohrid

19-22 September 2018

The Society of Chemists and Technologists of Macedonia

Сојуз на хемичарите и технолозите на Македонија

issues this

CERTIFICATE

to the authors:

Rodrigo Reis De Moura, Maria Angela De B. C. Menezes, Wellington Ferrari Da Silva, Igor Felipe Silva Moura, Vinicius Verna Magalhães Ferreira, Alberto Avellar Barreto

for the poster presentation titled:

NUCLEAR TECHNOLOGY DEVELOPMENT CENTRE, BELO HORIZONTE, BRAZIL:

ENVIRONMENTAL MONITORING PROGRAM (AEC, P-11)

Trajče Stafilov,

President of the Scientific committee

Viktor Stefov,

President of the Organizing committee



Zoran Zdravkovski,

President of SCTM



ANEXO

REX NAZARÉ ALVES

Membro

IVAN PEDRO SALATI DE ALMEIDA

Membro

CRISTOVÃO ARARIPE MARINHO

Membro

ISAAC JOSÉ OBADIA

Membro

(DOU nº 078, de 28/04/2014 - Pág. 04 - Seção 1)

RESOLUÇÃO Nº 166, DE 16 DE ABRIL DE 2014

A COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, criada pela Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, usando das atribuições que lhe confere a Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974, com as alterações introduzidas pela Lei nº 7.781, de 17 de junho de 1989 e pelo Decreto nº 5.667, publicado no Diário Oficial da União de 11 de janeiro de 2006, por decisão de sua Comissão Deliberativa, adotada na 615ª Sessão, realizada em 16 de ABRIL de 2014, e considerando o processo de licenciamento das instalações radiativas aprovado pela Resolução CNEN nº 112/11, RESOLVE:

Art. 1º Aprovar a Norma CNEN NN 6.02 Licenciamento de Instalações Radiativas, anexa a esta Resolução.

Art. 2º Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação, ficando revogada a Resolução CNEN nº112, de 24 de agosto de 2011, publicada no DOU de 01.09.2011.

ANGELO FERNANDO PADILHA

Presidente

REX NAZARÉ ALVES

Membro

IVAN PEDRO SALATI DE ALMEIDA

Membro

CRISTOVÃO ARARIPE MARINHO

Membro

ISAAC JOSÉ OBADIA

Membro

**NORMA CNEN NN 6.02
LICENCIAMENTO DE INSTALAÇÕES RADIATIVAS**

Dispõe sobre o licenciamento de instalações radiativas que utilizam fontes seladas, fontes não-seladas, equipamentos geradores de radiação ionizante e instalações radiativas para produção de radioisótopos.

Art. 1º Esta norma tem por objetivo estabelecer os requisitos para o licenciamento de instalações radiativas, aplicando-se às atividades relacionadas com a localização, o projeto descritivo dos itens importantes à segurança, a construção, a operação, as modificações e a retirada de operação de instalações radiativas, bem como ao controle de aquisição e movimentação de fontes de radiação.

§1º Entende-se por instalação radiativa o espaço físico, local, sala, prédio ou edificação de qualquer tipo onde pessoa jurídica, legalmente constituída, utilize, produza, processe, distribua ou armazene fontes de radiação ionizante.

§2º As disposições constantes desta Norma não se aplicam a:

I - instalações de radiodiagnóstico médico ou odontológico que utilizam aparelhos de raios-X;

II - instalações minero-industriais com urânio e/ou tório associado;

III - instalações nucleares;

IV - veículos transportadores de fontes de radiação, quando estas não são partes integrantes dos mesmos; ou

V - depósitos de rejeitos radioativos que se localizem em edificação distinta da instalação radiativa na qual esses rejeitos foram gerados.

Art. 2º Para fins de aplicação desta Norma, as instalações radiativas subdividem-se em: instalações que utilizam fontes seladas; instalações que utilizam fontes não seladas; instalações que utilizam equipamentos geradores de radiação ionizante; e instalações para produção de radioisótopos e classificam-se, segundo a gradação do risco, em grupos e subgrupos, conforme o disposto no Capítulo I.

CAPÍTULO I DA CLASSIFICAÇÃO DAS INSTALAÇÕES RADIATIVAS

Seção I

Das Instalações que Utilizam Fontes Seladas

Art. 3º As instalações radiativas que utilizam fontes seladas são classificadas nos seguintes grupos e subgrupos:

I - GRUPO 1 - Instalações de grande porte que utilizam fontes seladas em processos industriais induzidos por radiação, nestes incluídos os irradiadores de grande porte utilizados para esterilização de materiais, para preservação de alimentos ou para outras aplicações da irradiação;

II - GRUPO 2 - Instalações que utilizam fontes seladas em equipamentos, subdividindo-se em:

a) SUBGRUPO 2A - Instalações que utilizam fontes seladas em equipamentos de grande porte autoblindados, que não permitem acesso às fontes nem à câmara de irradiação, e nos quais não há o deslocamento das fontes em operação rotineira; ou

b) SUBGRUPO 2B - Instalações que utilizam fontes seladas em equipamentos para fins de radioterapia, nas modalidades de teleterapia e braquiterapia com altas taxas de dose; radiografia industrial; e de outras práticas que requeiram blindagem externa para a utilização das fontes; e

III - GRUPO 3 - Instalações, incluindo aquelas para fins de comércio e prestação de serviços, nas quais se manipulam, utilizam ou armazenam fontes seladas que não se enquadram nos GRUPOS 1 e 2, as quais, considerando os valores de referência D, listados no Anexo I, se subdividem em um dos subgrupos especificados a seguir:

a) No caso de um único radionuclídeo:

1. SUBGRUPO 3A - Instalações que utilizam fontes seladas com atividade inferior ou igual a 1/10 (um décimo) do valor de referência D;

2. SUBGRUPO 3B - Instalações que utilizam fontes seladas com atividade superior a 1/10 (um décimo) do valor de referência D e inferior ou igual a D; ou

3. SUBGRUPO 3C - Instalações que utilizam fontes seladas com atividade superior ao valor de referência D; e

b) Caso a instalação utilize mais de uma fonte selada, sua classificação será determinada pelo valor da atividade normalizada de fontes seladas (S_N), de acordo com a seguinte fórmula:

$$S_N = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{D_i}$$

onde A_i é a atividade de cada radionuclídeo i e D_i é o valor de referência para fontes seladas, listado no Anexo I para o radionuclídeo i . Portanto, a instalação será classificada como:

1. SUBGRUPO 3A, se S_N for menor ou igual a 0,1 (um décimo);

2. SUBGRUPO 3B, se S_N for maior que 0,1 (um décimo) e menor ou igual a 1 (um); ou

3. SUBGRUPO 3C, se S_N for maior que 1 (um).

Seção II

Das Instalações que Utilizam Fontes Não-Seladas

Art. 4º As instalações radiativas nas quais se manipulam, armazenam ou utilizam fontes não-seladas, incluindo aquelas para fins de comércio e prestação de serviços, são classificadas nos seguintes grupos, tomando por base o nível de isenção estabelecido na norma CNEN NN 3.01 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica e na Posição Regulatória PR 3.01/001 Critérios de Exclusão, Isenção e Dispensa de Requisitos de Proteção Radiológica:

I - GRUPO 4 - instalações radiativas que manipulam, armazenam ou utilizam fonte não-selada com atividade total até 30 vezes o nível de isenção;

II - GRUPO 5 - instalações radiativas que manipulam, armazenam ou utilizam fonte não-selada com atividade total entre 30 vezes e 20.000 vezes o nível de isenção; ou

III - GRUPO 6 - instalações radiativas que manipulam, armazenam ou utilizam fonte não-selada com atividade total superior a 20.000 vezes o nível de isenção.

§ 1º Caso a instalação utilize mais de um radionuclídeo, seu grupo será determinado pelo valor da atividade normalizada (A_N), de acordo com a seguinte fórmula:

$$A_N = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{L_i}$$

onde A_i é a atividade de cada radionuclídeo i e L_i é o nível de isenção do radionuclídeo i .

§ 2º Na hipótese do parágrafo anterior, considerando o valor de A_N calculado, a instalação será classificada como:

I - GRUPO 4, se A_N for menor ou igual a 30;

II - GRUPO 5, se A_N for maior que 30 e menor ou igual a 20.000; ou

III - GRUPO 6, se A_N for maior que 20.000.

Seção III

Das Instalações que Utilizam Equipamentos Geradores de Radiação Ionizante

Art. 5º As instalações radiativas que utilizam equipamentos geradores de radiação ionizante estão classificadas no GRUPO 7, compreendendo as instalações que utilizam aceleradores de partículas ou quaisquer outros aparelhos geradores de raios-X.

Parágrafo único. As instalações a que se refere o caput deste artigo devem ser classificadas em um dos subgrupos especificados a seguir, conforme o nível de energia de feixe gerado pelos equipamentos utilizados:

I - SUBGRUPO 7A - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzam feixe com energia menor ou igual a 0,10 MeV;

II - SUBGRUPO 7B - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 0,10 MeV e menor ou igual a 0,60 MeV;

III - SUBGRUPO 7C - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 0,60 MeV e menor ou igual a 50 MeV; ou

IV - SUBGRUPO 7D - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 50 MeV.

Seção IV

Das Instalações para Produção de Radioisótopos

Art. 6º As instalações radiativas destinadas à produção de radioisótopos são classificadas no GRUPO 8.

CAPÍTULO II

DO PROCESSO DE LICENCIAMENTO

Seção I

Dos Atos Administrativos e Requerimentos

Art. 7º As pessoas jurídicas que desejarem operar instalações radiativas devem requerer, previamente ao início de suas atividades, as devidas autorizações junto à CNEN, em conformidade com esta Norma.

Art. 8º O processo de licenciamento de uma instalação radiativa compreende os seguintes Atos Administrativos:

I - Aprovação do Local, necessária para as instalações radiativas dos GRUPOS 1 e 8 e do SUBGRUPO 7D;

II - Autorização para Construção, necessária para as instalações radiativas dos GRUPOS 1, 6 e 8 e dos SUBGRUPOS 2B, 3C, 7C e 7D;

III - Autorização para Modificação de Itens Importantes à Segurança, para as instalações radiativas dos GRUPOS 1, 6 e 8 e dos SUBGRUPOS 2B, 3C, 7C e 7D;

IV - Autorização para Aquisição ou Movimentação de Fontes de Radiação, para todas as instalações radiativas;

V - Autorização para Comissionamento, necessária para as instalações radiativas dos GRUPOS 1 e 8 e do SUBGRUPO 7D;

VI - Autorização para Operação, para todas as instalações radiativas;

VII - Autorização para Retirada de Operação, para todas as instalações radiativas.

Parágrafo único. Os prazos de validade das autorizações para operação encontram-se disciplinados no Anexo II desta Norma.

Art. 9º As informações a serem prestadas à CNEN, relativas ao processo de licenciamento de instalações radiativas, devem ser encaminhadas por meio de requerimentos, conforme formulários específicos, disponíveis no portal da CNEN na Internet www.cnem.gov.br e listados no Anexo III.

Parágrafo único. Eventual solicitação de alterações ou emendas em Atos de aprovação ou de autorização emitidos pela CNEN deve ser realizada por meio dos mesmos formulários necessários para a concessão do respectivo Ato.

Art. 10 Toda e qualquer instalação radiativa deve contar com, pelo menos, um supervisor de proteção radiológica e pessoal qualificado, de acordo com normas específicas expedidas pela CNEN.

Parágrafo único. Os grupos de instalações radiativas que requerem mais de um supervisor de proteção radiológica estão especificados no Anexo II.

Seção II

Da Aprovação do Local

Art. 11 O requerimento para Aprovação do Local deve ser acompanhado de um Relatório de Local (RL) que contenha todos os dados e informações que permitam analisar a viabilidade do local proposto para a instalação radiativa, abrangendo os seguintes aspectos:

I - características de utilização das cercanias, incluindo a distribuição da população local, as vias de acesso e as distâncias aos centros de população;

II - características gerais de projeto e de operação da instalação proposta, a utilização pretendida, a capacidade nominal, a natureza e inventário dos materiais radioativos a serem contidos, as características de segurança que serão incluídas e os sistemas de contenção previstos para evitar a liberação de material radioativo ou a irradiação externa de pessoas;

III - análise preliminar do potencial de impacto radiológico da instalação no meio ambiente, em operação normal e em caso de acidente; e

IV - programa preliminar de monitoração ambiental pré-operacional.

Seção III

Da Autorização para Construção

Art. 12 O requerimento para Autorização para Construção deve ser acompanhado de um Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS) que contenha todos os dados e informações que permitam analisar as características de segurança envolvidas, abrangendo os seguintes aspectos:

I - qualificações técnicas do responsável pelo projeto descritivo dos itens importantes à segurança e pela construção;

II - descrição e análise da instalação, com atenção especial às características de projeto e de operação;

III - análise preliminar e avaliação do projeto e desempenho de estruturas, sistemas e componentes da instalação, identificando os itens importantes à segurança, com o objetivo de avaliar os aspectos de segurança e de proteção radiológica;

IV - programa de garantia da qualidade do requerente e dos contratados principais, a ser aplicado às atividades de gerenciamento, projeto, fabricação, aquisição, construção civil e montagem eletromecânica de itens importantes à segurança da instalação;

V - planos preliminares para procedimentos em situações de emergência, que devem ser suficientes para assegurar a compatibilidade do futuro plano de emergência com as características do projeto da instalação;

VI - plano preliminar de gerência de rejeitos radioativos, incluindo a descrição dos sistemas de controle de liberação de efluentes;

- VII - relação das normas técnicas e códigos a serem adotados;
- VIII - plano preliminar de proteção física, descrevendo as medidas para prevenir roubo, perda e uso não autorizado de fontes ou materiais radioativos; e
- IX - plano preliminar de proteção radiológica.

Art. 13 Independem de autorização da CNEN, sendo de exclusiva responsabilidade do requerente e não implicando em qualquer compromisso de concessão de autorização da CNEN, as seguintes atividades:

- I - a exploração e escavação preliminar do local e a preparação de infraestrutura para obras de construção, tais como: canteiro de obras, vias de acesso, linhas de transmissão, edificações temporárias e edificações não destinadas a itens importantes à segurança; e
- II - a construção de edificações não destinadas à utilização, manuseio ou armazenamento de fontes de radiação.

Seção IV

Da Autorização para Comissionamento

Art. 14 O requerimento de Autorização para Comissionamento para instalações do GRUPO 1 e 8 e do SUBGRUPO 7D deve ser acompanhado de Relatório que contenha informações e dados que permitam analisar as características de segurança envolvidas, abrangendo os seguintes aspectos:

- I - controles físicos e administrativos usados para restringir o acesso às áreas controladas durante os testes;
- II - comprovação de que todas as pessoas envolvidas no comissionamento receberam treinamento específico, antes de o mesmo ter início;
- III - descrição de medidas tomadas para garantir a segurança dos trabalhadores durante os testes;
- IV - descrição detalhada dos testes a serem executados para garantir que todos os sistemas de segurança operam eficientemente, incluindo sistemas de intertravamento, sinais luminosos ou sonoros de feixe ligado/desligado e botões de emergência;
- V - nome e descrição da experiência profissional do responsável pelo planejamento e supervisão do comissionamento;
- VI - tempo de operação requerido durante o comissionamento;
- VII - lista de testes que serão efetuados no equipamento para verificação de seu desempenho;
- VIII - metodologia para verificação da adequação das blindagens, incluindo a realização de um levantamento radiométrico detalhado;
- IX - descrição de equipamentos que serão utilizados no levantamento radiométrico; e
- X - laudo técnico emitido por profissional registrado no Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia, CREA, atestando que a instalação foi construída em conformidade com o projeto apresentado à CNEN, incluindo a densidade e a espessura de cada barreira empregada como blindagem.

Seção V

Da Autorização para Modificação de Itens Importantes à Segurança

Art. 15 O requerimento de Autorização para Modificação de Itens Importantes à Segurança deve descrever completamente as modificações propostas que só podem ser executadas numa instalação radiativa com prévia autorização da CNEN.

Parágrafo único. Entende-se por itens importantes à segurança aqueles que incluem ou estão incluídos em:

- I - estruturas, sistemas e componentes cuja falha ou mau funcionamento pode resultar em exposições indevidas à radiação do pessoal da instalação ou membros do público em geral;
- II - estruturas, sistemas e componentes que evitam que ocorrências operacionais previstas resultem em condições de acidente; ou
- III - dispositivos ou características necessárias para atenuar as conseqüências de falha ou mau funcionamento de estruturas, sistemas e componentes listados nos incisos I e II.

Seção VI

Da Autorização para Aquisição ou Movimentação de Fontes de Radiação

Art. 16 O requerimento para Autorização para Aquisição ou Movimentação de Fontes de Radiação deve ser acompanhado de documentação comprobatória de que:

- I - o projeto da instalação satisfaz às condições exigidas nesta Norma e em normas específicas da CNEN;
- II - existe previsão para o armazenamento seguro da fonte; e
- III - a instalação tem profissional qualificado com registro na CNEN para responder pela segurança da fonte de radiação.

Seção VII

Da Autorização para Operação

Art. 17 O requerimento de Autorização para Operação de instalações do GRUPO 4 e dos SUBGRUPOS 3A e 7A deve abranger os seguintes itens:

- I - identificação da instalação e da sua estrutura organizacional;
- II - classificação e descrição da instalação, com detalhes construtivos, anexando croqui;
- III - condução da operação, contendo:
 - a) descrição da prática;
 - b) descrição da equipe, incluindo função, qualificação e jornada de trabalho;
 - c) descrição dos equipamentos emissores de radiação a serem empregados, em instalações do SUBGRUPO 7A;
 - d) relação de radionuclídeos a serem empregados, incluindo atividade de cada fonte, em instalações do GRUPO 4 e do SUBGRUPO 3A;
 - e) registros a serem mantidos na instalação;
 - f) instruções para monitoração de área;
 - g) instruções de proteção radiológica, incluindo procedimentos para condução segura da operação, prevenção de contaminação de pessoal e de área, específicas para indivíduos ocupacionalmente expostos e para indivíduos do público.
- IV - procedimentos de gerência de rejeitos radioativos, incluindo as etapas de segregação, identificação, armazenamento e descarte, exceto para instalações do SUBGRUPO 7A;
- V - procedimentos em situação de emergência envolvendo incêndio, inundação ou furto da fonte de radiação; e
- VI - informações a serem prestadas para retirada de operação da instalação.

Art. 18 O requerimento de Autorização para Operação de instalações dos GRUPOS 1, 2, 5, 6 e 8 e dos SUBGRUPOS 2A, 2B, 3B, 3C, 7B, 7C e 7D deve ser acompanhado de um Relatório Final de Análise de Segurança, RFAS, que contenha dados que permitam à CNEN analisar a conformidade das características existentes com os requisitos normativos, abrangendo, no mínimo, os seguintes aspectos:

- I - projeto da instalação; e
- II - plano de proteção radiológica, contendo:
 - a) organização do pessoal e responsabilidades;
 - b) plano de treinamento do pessoal;
 - c) plano para condução das operações;
 - d) programa de garantia da qualidade dos itens importantes à segurança para a fase de operação;
 - e) controles administrativos a serem aplicados durante a operação, incluindo medidas relativas à organização e gerência, procedimentos, verificações, auditorias e comunicações, necessárias para garantir a operação segura da instalação radiativa;
 - f) plano de emergência;
 - g) especificações referentes a características da instalação radiativa de importância relevante para a segurança e para a proteção radiológica, a serem adotadas para a operação;
 - h) plano de proteção física;
 - i) plano de gerência de rejeitos radioativos; e
 - j) plano de transporte de materiais radioativos.

Parágrafo único. A análise a ser efetuada pela CNEN levará em consideração os aspectos de exposição à radiação ionizante que possam colocar em risco a saúde de indivíduos ocupacionalmente expostos e do público, bem como o impacto radiológico sobre o meio ambiente.

Art. 19 A Autorização para Operação será concedida após comprovação do atendimento aos seguintes requisitos:

I - conclusão da construção da instalação de acordo com as disposições legais, regulamentares e normativas e, quando aplicável, com as condições da Autorização para Construção e seus aditamentos; e

II - comprovação de que a operação prevista será conduzida em conformidade com os requisitos de proteção radiológica estabelecidos nas normas emitidas pela CNEN.

Parágrafo único. A Autorização para Operação poderá sofrer alteração, desde que a alteração proposta na instalação não implique em modificação de itens importantes à segurança; neste caso, é necessária a emissão de Autorização para Modificação de Itens Importantes à Segurança.

Art. 20 As informações que foram prestadas à CNEN com vistas à Autorização para Operação deverão ser mantidas atualizadas.

Art. 21 Eventual alteração de algum item especificado na Autorização para Operação deverá ser requerida na forma do parágrafo único do artigo 9º desta Norma, devendo o interessado especificar completamente as alterações propostas.

Parágrafo único. Quando a Autorização para Operação for alterada, o prazo de validade da Autorização para Operação permanecerá o mesmo.

Art. 22 Caso esteja prevista a modificação de itens importantes à segurança, deverá ser solicitada previamente a emissão de Autorização para Modificação de Itens Importantes à Segurança.

Art. 23 A renovação da Autorização para Operação deverá ser solicitada com o mínimo de trinta dias de antecedência do prazo previsto para o término de sua validade, na forma do disposto no artigo 8º, parágrafo único e no Anexo II desta Norma.

Seção VIII

Da Autorização para Retirada de Operação

Art. 24 As instalações radiativas que decidirem encerrar suas atividades deverão solicitar Autorização para Retirada de Operação, mediante requerimento encaminhado à CNEN, acompanhado de Plano de Descomissionamento contendo, no mínimo, as seguintes informações:

I - inventário dos materiais radioativos e dos equipamentos emissores de radiação ionizante;

II - destino a ser dado aos materiais radioativos, demais fontes de radiação e aos rejeitos radioativos gerados no descomissionamento;

III - procedimentos técnicos e administrativos para avaliação dos níveis de radiação e para a descontaminação de áreas, superfícies e equipamentos;

IV - destino a ser dado aos registros que devam ser conservados.

CAPÍTULO III DAS ISENÇÕES

Art. 25 Estão isentas do processo de licenciamento estabelecido nesta Norma as instalações que utilizem, produzam, processem, distribuam ou armazenem fontes de radiação e que atendam, em qualquer instante, aos critérios de isenção estabelecidos na norma CNEN NN 3.01 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica e na Posição Regulatória PR 3.01/001 Critérios de Exclusão, Isenção e Dispensa de Requisitos de Proteção Radiológica.

Parágrafo único. No caso de instalação que envolva a presença de um número "n" de radionuclídeos, o critério de isenção é dado pela seguinte relação:

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{L_i} \leq 1$$

onde A_i é a atividade do radionuclídeo i e L_i é seu respectivo nível de isenção.

CAPÍTULO IV DAS DISPOSIÇÕES TRANSITÓRIAS

Art. 26 As instalações radiativas que se encontram construídas, comissionadas e em funcionamento na presente data, sem os Atos Administrativos pertinentes, estão dispensadas da solicitação dos Atos Administrativos aplicáveis às etapas vencidas (Aprovação do Local, Autorização para Construção e Autorização para Comissionamento).

§1º Essas instalações terão um prazo de dois anos, a partir da publicação desta norma, para regularizar o respectivo processo de licenciamento, mediante a solicitação formal do Ato Administrativo de Autorização para Operação.

§2º As instalações radiativas dos grupos ou subgrupos 1, 6, 8, 2B, 3C, 7C ou 7D devem solicitar diretamente o Ato Administrativo de Autorização para Operação e encaminhar um RFAS que inclua as seguintes informações adicionais:

I - descrição detalhada dos seguintes itens:

- a) fontes de radiação ionizante;
- b) expectativa de uso máximo da instalação, tanto na fase de comissionamento quanto na fase de operação;
- c) estruturas utilizadas para fins de blindagem; e
- d) dispositivos e sistemas de segurança existentes;

II - plantas atualizadas da instalação existente, como construída, compostas, no mínimo, por planta baixa e cortes transversais e longitudinais, em escala, com os seguintes detalhamentos:

- a) identificação dos locais de uso, manipulação e/ou armazenamento de fontes de radiação ionizante e descrição das respectivas adjacências;
- b) classificação de áreas;
- c) identificação dos acessos às áreas controladas e supervisionadas;
- d) localização dos monitores de radiação fixos;
- e) identificação dos locais para armazenamento temporário de rejeitos radioativos;
- f) identificação do bunker e respectivas adjacências, como laterais, teto e piso, além da descrição do uso e ocupação das vizinhanças e dos respectivos acessos;
- g) identificação das estruturas utilizadas como blindagem, tais como localização, tipo de material, espessura, densidade, e eventuais acessos, dutos ou qualquer tipo de penetração que possa representar impacto nas blindagens; e
- h) localização dos dispositivos e mecanismos que compõem os sistemas de intertravamento e segurança.

III - descrição e resultado dos testes de comissionamento realizados e/ou testes periódicos que atestem a funcionalidade dos sistemas de segurança instalados;

IV - Programa de Monitoração Individual, incluindo as doses efetivas registradas para todos os indivíduos ocupacionalmente expostos nos últimos cinco anos de funcionamento da instalação, comparando os respectivos resultados aos limites estabelecidos nas normas da CNEN. Deve ainda ser incluída uma breve descrição dos acidentes e situações de emergência ocorridos no período;

V - Programa de Monitoração de Área, incluindo a localização de todos os pontos rotineiramente monitorados e a descrição das condições operacionais mais adversas ocorridas nos últimos cinco anos, com as datas e respectivas medidas registradas. Deve ainda ser efetuado um levantamento radiométrico atualizado, em condições extremas de operação, com base no mesmo, estimar a dose efetiva anual para indivíduos ocupacionalmente expostos e do público, levando em conta a classificação de áreas e os fatores de uso e ocupação, comparando os respectivos resultados com os limites estabelecidos nas resoluções da CNEN; e

VI - as instalações enquadradas no grupo 8 devem ainda apresentar:

- a) relatório descrevendo as condições operacionais mais adversas ocorridas nos últimos cinco anos, com registro de datas e respectivos resultados de monitoração das liberações de efluentes líquidos e gasosos, comparando os respectivos resultados aos requisitos da Norma CNEN NE 6.05 Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas, ou outra que vier a substituí-la; e
- b) descrição e detalhamento do sistema de exaustão/ventilação, com a circulação de ar no interior dos recintos e respectivos pontos de descarga, identificando esse sistema e seus respectivos componentes nas plantas apresentadas.

§3º Incluem-se no escopo deste artigo as instalações radiativas pertencentes aos Centros e Institutos de Pesquisa da CNEN, inclusive aquelas para as quais foi emitido um Certificado de Aprovação do Relatório de Análise de Segurança (CRAST) conforme Instrução Normativa IN-001/94.

CAPÍTULO V DAS DISPOSIÇÕES FINAIS

Art. 27 Os Certificados de Aprovação do Relatório de Análise de Segurança da Instalação (CRAST) emitidos para as instalações radiativas pertencentes aos Centros e Institutos de Pesquisa da CNEN, conforme item 6.1 b) da Instrução Normativa IN-001/94, ficam revogados a partir da emissão da Autorização para Operação.

Art. 28 O titular de cada instalação radiativa é responsável pelo cumprimento dos requisitos estabelecidos em normas e Atos Administrativos da CNEN, relativos a essa instalação.

Art. 29 A fim de garantir o cumprimento dos requisitos de segurança e proteção radiológica estabelecidos nas normas da CNEN, os Atos Administrativos emitidos pela CNEN são passíveis de:

- I - Revogação: quando ocorrer interesse público superveniente;
- II - Suspensão: quando houver comprometimento da segurança da instalação; ou
- III - Cassação: por não cumprimento das normas legais na sua execução.

Art. 30 As instalações radiativas estão sujeitas à fiscalização da CNEN, com o objetivo de verificar o cumprimento das normas e das condições de licenciamento.

ANEXO I VALORES DE REFERÊNCIA D, PARA FINS DE CLASSIFICAÇÃO DAS INSTALAÇÕES RADIATIVAS DO GRUPO 3

Radionuclídeo ⁽⁰⁾	Valores de referência D ⁽⁰⁾	
	(TBe)	(CI)
Am-241	6E-02	2E+00
Am-241/Be	6E-02	2E+00
Au-198	2E-01	5E+00
Cd-109	2E+01	5E+02
Cf-252	2E-02	5E-01
Cm-244	5E-02	1E+00
Co-57	7E-01	2E+01
Co-60	3E-02	8E-01
Cs-137	1E-01	3E+00
Fe-55	8E+02	2E+04
Gd-153	1E+00	3E+01
Ge-68	7E-02	2E+00
I-125	2E-01	5E+00
Ir-192	8E-02	2E+00
Kr-85	3E+01	8E+02
Mo-99	3E-01	8E+00
Ni-63	6E+01	2E+03
Pd-103	9E+01	2E+03
Pm-147	4E+01	1E+03
Po-210	6E-02	2E+00
Pu-238	6E-02	2E+00
Pu-239/Be	6E-02	2E+00
Ra-226	4E-02	1E+00
Ru-106 (Rh-106)	3E-01	8E+00
Se-75	2E-01	5E+00
Sr-90 (Y-90)	1E+00	3E+01
Tl-204	2E+01	5E+02
Tm-170	2E+01	5E+02
Yb-169	3E-01	8E+00

NOTAS:

(a) A CNEN deverá ser consultada para a classificação de instalações com outros radionuclídeos que não constem desta relação.

(b) Os valores de referência D estão associados ao risco de efeitos determinísticos, com base em cenários de exposição e considerando critérios de dose.

ANEXO II
VALIDADE DA AUTORIZAÇÃO PARA OPERAÇÃO E
NÚMERO MÍNIMO DE SUPERVISORES DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA CADA
GRUPO DE
INSTALAÇÕES RADIATIVAS

Grupos	Validade da autorização para operação	Nº mínimo de supervisores de proteção radiológica
3A 4 7A	3 a 5 anos	1 (um)
2A 3B 5 7B	1 a 3 anos	1 (um)
2B 3C 6 7C 7D	1 a 3 anos	1 (um), a menos que estabelecido em norma específica
1 8	1 a 2 anos	2 (dois)

ANEXO III
RELAÇÃO DE FORMULÁRIOS PARA SOLICITAÇÃO DE
ATOS ADMINISTRATIVOS DE LICENCIAMENTO DE
INSTALAÇÕES RADIATIVAS

Ato Administrativo	Formulário ^(a)
Aprovação do Local	SCRA
Autorização para Construção	SCRA
Autorização para Aquisição ou Movimentação de Fontes de Radiação	RAR RTR SLI PER
Autorização para Comissionamento	SCRA
Autorização para Operação	SCRA
Retirada de Operação	SCRA, RTR, PER
Renovação da Autorização para Operação	SCRA
Autorização para Modificação de Itens Importantes à Segurança	SCRA

NOTA: (a) Formulários disponíveis em www.cnem.gov.br:

SCRA - Solicitação de Concessão de Registros e Autorizações;
RAR - Requerimento para Aquisição de Radioisótopos junto a um distribuidor;

RTR - Requerimento de Transferência de Fonte Radioativa ou Equipamento Gerador de Radiação Ionizante entre instalações radiativas;

PER - Permissão para Exportação de Fonte Radioativa;

SLI – Solicitação de Licença de Importação de material radioativo ou equipamento gerador de radiação ionizante.
(DOU nº 080, de 29/04/2014 - Pág. 30 a 32 - Seção 1)

ATOS DA PRESIDÊNCIA

PORTARIA Nº 023, DE 25 DE ABRIL DE 2014

O PRESIDENTE DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN), no uso das atribuições conferidas pelo artigo 14, incisos I e V, do Anexo I, ao Decreto nº 5.667, publicado no Diário Oficial da União de 11 de janeiro de 2006, Resolve:

Designar **MIRACY WERMELINGER PINTO LIMA**, matrícula SIAPE nº0667852, ocupante do cargo permanente de Analista em Ciência e Tecnologia, para exercer a função de Chefe de Gabinete-Substituta da Presidência - DAS 101.4, no período de 11.05.2014 a 30.05.2014, em razão das Férias do Titular.

ANGELO FERNANDO PADILHA

Presidente

(DOU nº 080, de 29/04/2014 - Pág. 03 - Seção 2)

PORTARIA Nº 024, DE 30 DE ABRIL DE 2014

O PRESIDENTE DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN), no uso das suas atribuições que lhe confere o artigo 14, incisos I e V, do anexo I ao decreto nº 5.667, publicado no DOU de 11 de janeiro de 2006, Resolve:

Art. 1º Constituir Grupo de Trabalho com o objetivo de elaborar documento sobre os níveis aceitáveis de radioatividade em água potável, a ser encaminhado ao Ministério da Saúde que está em processo de revisão da Portaria referente ao tema.

Art. 2º São membros do Grupo de Trabalho:

- Eduardo Mendonça Costa - Coordenador (DINOR)
- Ieda Gomes Nicollí (ESBRA)
- Lene Holanda Sadler Veiga (IRD)
- Barbara Paci Mazzilli (IPEN)
- Mariza Ramalho Franklin (IRD)

Art. 3º O grupo de trabalho terá o prazo de 15 dias para apresentar as suas conclusões.

Art. 4º Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação e revogam-se as disposições em contrário.

ANGELO FERNANDO PADILHA

Presidente

ATOS DA DIRETORIA DE GESTÃO INSTITUCIONAL

PORTARIA Nº 087 DE 17 DE ABRIL DE 2014

O Diretor de Gestão Institucional da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), no uso da atribuição que lhe foi conferida pela Portaria CNEN/PR nº 33, publicada no Diário Oficial da União nº 106, de 01 de junho de 2012, Seção 1, páginas 13 e 14, resolve:

Homologar o resultado final do Estágio Probatório da servidora nomeada pela Portaria nº 97, de 11 de outubro de 2010, publicada no Diário Oficial da União nº 196, de 13 de outubro de 2010, Seção 2, páginas 4 a 6:

Unidade: IPEN

NOME	RESULTADO
Cecilia Chaves Guedes e Silva	Aprovado

CRISTÓVÃO ARARIPE MARINHO
Diretor de Gestão Institucional

PORTARIA Nº 088, DE 25 DE ABRIL DE 2014

O DIRETOR DE GESTÃO INSTITUCIONAL, DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN), no uso da atribuição que lhe foi conferida pela Portaria CNEN/PR nº 33, publicada no Diário Oficial da União nº 106, de 01 de junho de 2012, páginas 13 e 14, seção 1, resolve:

Prorrogar, nos termos do artigo 152, da Lei nº 8112, de 11/12/90, por 60 (sessenta) dias, o prazo para conclusão do Processo Administrativo Disciplinar instaurado através da Portaria nº 040, publicada no Boletim de Serviço nº 04, de 06/03/2014, constante do Processo CNEN nº 01341.000419/2013-96.

CRISTÓVÃO ARARIPE MARINHO
Diretor de Gestão Institucional

ATOS DA COORDENAÇÃO-GERAL DE RECURSOS HUMANOS

USUFRUTO DE LICENÇA PRÊMIO INICIADAS NO MÊS DE MAIO/2014

(Resolução do Senado nº 35)

Nome	Mat. STAPE	Lotação	Quinquênio de Referência	Dias	Início	Término	Retorno
ROSEIVAL MARTINS DE SOUZA	0667066	SDE/INCMAT	14/01/1990 A 13/03/1990	30	15/05/2014	13/06/2014	15/06/2014
CLAUDIO RIBEIRO DA SILVA	0667043	SDE/TONEL	24/01/1990 A 23/03/1990	30	05/05/2014	03/06/2014	04/06/2014

SANDRA CRISTIANE CAMPOS FIRMINO
Coordenadora-Geral de Recursos Humanos

ATOS DA COORDENAÇÃO DO LABORATÓRIO DE POÇOS DE CALDAS

PORTARIA Nº 11, DE 22 DE ABRIL DE 2014

O COORDENADOR DO LABORATÓRIO DE POÇOS DE CALDAS - LAPOC, DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR-CNEN, no uso das atribuições e competências que lhe são conferidas pela Portaria CNEN nº 224, de 15.07.2005 (D.O.U. de 19.07.2005) e a de nº 122, de 07.12.2005 (D.O.U. de 08.12.2005) resolve:

Designar a servidora abaixo relacionada como Pregoeira, atendendo ao que determina o inciso IV, do Art. 3º da Lei 10.520, de 17 de julho de 2002, o inciso III do Art. 7º do Decreto 3.555, de 08 de agosto de 2000 e o Art. 10º do Decreto 5.450, de 31 de maio de 2005, visando a elaboração de editais e a realização de procedimentos licitatórios sob a modalidade "Pregão", pelo período de 01 (um) ano.

Pregoeira: VIVIAN GARRO BRITO DE ARAÚJO

Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação.

ANTONIO LUIZ QUINELATO
Coordenador do LAPOC
(DOU nº 076, de 23/04/2014 - Pág. 05 - Seção 2)

ATOS DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

PORTARIA N.º 016 DE 29 DE ABRIL DE 2014

O DIRETOR DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR (IEN), no uso das atribuições conferidas pela Portaria CNEN/PR n.º 23, de 18 de abril de 2012, publicada no Diário Oficial da União n.º 76, página 6, Seção 2, de 19 de abril de 2012, RESOLVE

Constituir Grupo de Trabalho multiprofissional com os servidores abaixo relacionados, sob a coordenação do primeiro, com o objetivo de planejar, atualizar e avaliar as ações de proteção física e controle de materiais sob salvaguardas no IEN.

- Francisco José de Oliveira Ferreira - SEREA
- Maria Isabel Barbosa da Silva - SEQNR
- João Regis dos Santos - CSPR

- Eugenio Rangel Marins - SEESC
- Rogério Chaffin Nunes - SERAD
- Edlone do Socorro Vasconcelos de Almeida - SESEG
- André Luis Nunes Barbosa - SEREA
- César Marques Salgado - SECIC

Esta portaria entra em vigor imediatamente, independente da data de publicação no boletim de serviço da CNEN.

PAULO AUGUSTO BERQUÓ DE SAMPAIO
Diretor do IEN

ATOS DO INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

PORTARIA Nº 88, DE 22 DE ABRIL DE 2014

O SUPERINTENDENTE DO INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, UNIDADE CONVENIADA À COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN/SP-IPEN, no uso das atribuições e competência que lhe são conferidas pela Portaria CNEN nº 31, de 12/03/2013, publicada no DOU nº 50, página 6, Seção 2, de 14/03/2013 e Portaria CNEN nº 88, de 17/12/2012, publicada no DOU de 18/12/2012, do Sr. Presidente da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, com base no Laudo Médico Pericial nº 0.036.056/2014, emitido pelo Subsistema Integrado de Atenção a Saúde do Servidor - SIASS-INSS/SP, resolve:

Conceder aposentadoria por invalidez, a partir de 27 de março de 2014, com proventos integrais, ao servidor **JOSÉ EDUARDO MANZOLI**, RG nº 18.572.668, CPF nº 122.414.548-85, matrícula SIAPE nº 1281495, ocupante do cargo permanente de Pesquisador Titular, classe U, padrão III, nível superior, vaga nº 418092, do quadro de pessoal da Comissão Nacional de Energia Nuclear, com fundamento no artigo 40, parágrafo 1º, inciso I, da Constituição Federal de 1988, combinado com o artigo 6º-A da Emenda Constitucional nº 41, de 19 de dezembro de 2003, incluído pelo artigo 1º da Emenda Constitucional nº 70, de 30 de março de 2012, e artigo 186, inciso I, parágrafo 1º da Lei nº 8.112, de 12 de dezembro de 1990, declarando, em decorrência, a vacância do cargo acima mencionado. (Processo CNEN/IPEN nº 01342000333/2014-34).

JOSÉ CARLOS BRESSIANI
DIRETOR IPEN
(DOU nº 077, de 24/04/2014 - Pág. 04/05 - Seção 02)

PORTARIA Nº 89, DE 22 DE ABRIL DE 2014

O SUPERINTENDENTE DO INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, UNIDADE CONVENIADA À COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN/SP-IPEN, no uso das atribuições e competência que lhe são conferidas pela Portaria CNEN nº 31, de 12/03/2013, publicada no DOU nº 50, página 6, Seção 2, de 14/03/2014, e Portaria CNEN nº 88, de 17/12/2012, publicada no DOU de 18/12/2012, do Sr. Presidente da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, resolve:

Conceder pensão vitalícia, na proporção de 100% (cem por cento), a partir de 28 de março de 2014, a **SHEILA MIGUEL MARIALVA**, RG nº 14.973.468-2, CPF nº 083.317.868-74, por motivo de falecimento, na mesma data, do servidor ANTONIO AUGUSTO MARIALVA NETO, matrícula SIAPE nº 0668481, ocupante do cargo permanente de Tecnologista Sênior, classe H, padrão III, nível superior, do quadro de pessoal da Comissão Nacional de Energia Nuclear, com fundamento no artigo 40, parágrafo 7º, inciso II e parágrafo 8º, da Constituição Federal de 1988, com a nova redação dada pela Emenda Constitucional nº 41, de 19 de dezembro de 2003, combinado com os artigos 216, parágrafo 1º, 217, inciso I, alínea "a" da Lei nº 8.112, de 11 de dezembro de 1990 e artigo 2º, inciso II da Lei nº 10.887, de 18 de junho de 2004. (Processo CNEN/IPEN nº 01342000364/2014-95).

JOSÉ CARLOS BRESSIANI
DIRETOR IPEN

(DOU nº 077, de 24/04/2014 - Pág. 04/05 - Seção 02)

ATOS DO INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA

PORTARIA Nº 020, DE 24 DE ABRIL DE 2014

A DIRETORA DO INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA (IRD), DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN), no uso da atribuição que lhe foi conferida pela Portaria CNEN/PR nº 77, de 24 de novembro de 2011, publicada no DOU 28 de novembro de 2011, Seção 1, Págs. 6 e 7, resolve:

Designar o Servidor **ERLI DOS SANTOS MARCHON**, Matrícula 05325-6 e, na sua ausência, o Servidor **GUILHERME VELOSO**, Matrícula 06833-8, atendendo o que determina o Artigo 67 da Lei nº 8.666/93, para atuar como Gestor do Contrato nº 007/2014, Processo nº 01343.0040/2014, firmado com a Empresa **IRMÃOS RIBEIRO COMÉRCIO DE RESÍDUOS E TRANSPORTE LTDA.**, para o serviço de coleta, transporte e destinação final de lixo extraordinário das instalações, do Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD/CNEN.

DEJANIRA DA COSTA LAURIA
Diretora do IRD

PORTARIA Nº 021, DE 28 DE ABRIL DE 2014

O DIRETOR SUBSTITUTO DO INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA (IRD), DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN), no uso da atribuição que lhe foi conferida pela Portaria CNEN/DGI nº 362, de 04 de dezembro de 2012, publicada no DOU de 05 de dezembro de 2012, Seção 2, Página 6, resolve:

Designar o Pregoeiro e os componentes da sua Equipe de Apoio, para constituírem a COMISSÃO ESPECIAL DE LICITAÇÃO - CEL, modalidade Pregão Eletrônico, atendendo ao que determina o inciso IV do artigo 3º da Lei nº 10.520/2002, destinada a "Contratação em empresa especializada para fornecimento de equipamentos de proteção individual - EPI", conforme especificações contidas no Processo IRD nº 01343.000110/2014.

- Fidel Furtado Sanchez (Assistente em C&T) - Pregoeiro

- **Alexssander de Antônio Nunes (Analista em C&T) - Pregoeiro Substituto**
- **Andréa Lucia Fanfa Ribas França Porto (Assistente em C&T) - Membro**
- **Carlos Alberto Rodrigues dos Santos (Tecnologista em C&T) - Membro**

DEJANIRA DA COSTA LAURIA
Diretora do IRD

APÊNDICE

APÊNDICE: Materiais utilizados no desenvolvimento da metodologia de trabalho.

DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICA	QTDE.
Abraçadeira	“tipo U” zincado	20 unid.
Abraçadeira de Nylon (preta)	30 cm	100 unid.
Álcool absoluto (anidro)		1 L
Balde preto “plástico”	12 L	01
Bancada de madeira	4,5 Comp. 0,8 Larg.	02
Bandejas	“tipo assadeira” de vidro Marinex	06
Borrifador de água	500 mL	01
Caderno de laboratório	100 pág.	01
Cadinho de fusão	Porcelana, forma alta	30 unid
Caneta permanente		
Cano “marrom” PVC soldável 20 mm ou 1/2”	3 m	10 unid.
Compressor de ar eletromagnético	25 W - 220v – 240v	01
Copo plástico	Descartável	01 pct.
Corda 12 mm poliamida para ancoragem – 30 cm	10 m	01
Dessecador de vidro	300 mm	01
Extensão elétrica	10 m (2 x 1 mm)	01
Filme Plástico para estufa	4 x 5 m – 100 micras	
Forno mufla	220v (6,7 L)	01
Gral e pistilo	porcelana	01
Luvras “tipo cirúrgica”	sem talco	1 cx
Mangueira em tygon para aeração	3 m	

Pá de jardinagem	Cabo de madeira	01
Papel toalha	Folha dupla	02 unid.
Pinça plástica		01
Pipeta de transferência	Fluxo ajustável	01
Plástico filme		01 cx.
Ponteira “tipo gancho” de ancoragem (piquete)	alumínio	10 unid.
Porta amostras de poliestireno	0,5 g e 1 g	(*)
Regador plástico	10 L	01
Sarrafo de madeira	80 x 5,0 x 1,8 cm	6 unid.
Solo de Poços de Caldas/MG	Coletado	3 kg
Solução Nutritiva	Preparada	(*)
Substrato orgânico (composto)	Pacote	01
Tela Sombrite para estufa 50%	4 x 10 m	01 rolo
Tesoura de poda	jardinagem	01
Trinco, dobradiças e cadeado	Fechamento da estufa	01
Vaso “tipo jardineira” de polietileno	3 L (30 unid.)	30 unid.