



Universidade Federal Fluminense

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

INSTITUTO DE FÍSICA

**Correlações Entre as Distribuições de Césio e
Potássio ao Longo de Plantas Tropicais.**

Newton Lima Sanches

Dissertação apresentada ao Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador:

Prof. Dr. Roberto Meigikos dos Anjos

Niterói

2008

*À razão de minha vida:
A minha amada esposa Munique*

Agradecimentos

Cada vez que uma etapa em nossas vidas se encerra a vontade de agradecer àqueles que de maneiras diversas contribuíram para o seu sucesso é intensamente desejada e por isso não poderia faltar nesse momento. Até porque, as próximas etapas virão e é sabendo o quão importantes essas figuras são em nossas vidas, que nos motivamos a seguir em frente com a certeza de que elas sempre estarão dispostas a nos ajudar a vencer os novos desafios.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer em especial a duas pessoas que são as principais responsáveis por todas as conquistas da minha vida e é somente por causa delas que cheguei até aqui para a realização desse trabalho: aos meus queridos avós Lucinda e Hamilton.

Agradeço também a minha querida mãe Deise, por toda a ajuda e pelo incentivo que me proporciona, por saber do orgulho que ela tem de mim e pelas palavras de amor e carinho. Agradeço ao meu pai Newton que apesar da distância sempre me incentiva com o seu carinho e abraço acolhedor. Aos meus irmãos Ailton e Meiriluci, por todo o carinho recebido. Agradeço ainda aos meus outros irmãos: Michele, Monique, Mike e Suelizinha, e aos meus sobrinhos: Iasmin, Rilary e Richard que sempre me enchem de carinhos nos encontros, por mais escassos que sejam.

Agradeço aos meus grandes amigos: Diego Uzeda, Leticia Estellita, Carla Carvalho, Bernardo Mosquera e Bernardo Coutinho por toda a ajuda e por tornar minha vida muito mais feliz nos momentos de descontração que cercam essas nossas vidas estressantes.

Aos outros amigos do LARA: Kita Macário, Mariana Vezzone, Rodrigo Veiga e Jonatham Bastos. Ao meu orientador Roberto Meigikos, que apesar das turbulências profissionais sempre se mostrou um grande amigo e confiou sempre no meu trabalho.

Agradeço também a todos os professores do Instituto de Física (IFUFF) pela formação e ajuda nos momentos de dificuldades.

Ao pessoal da limpeza que faz do nosso ambiente de trabalho um lugar mais agradável.

E agradeço também ao CNPq e a Pós-Graduação do IF-UFF pela ajuda financeira indispensável para a realização desse trabalho.

Resumo

Foram realizadas medidas de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K ao longo de diferentes espécies de plantas tropicais herbáceas e lenhosas: mandioqueira (*Manihot esculenta*), bananeira (*Musa paradisiaca*), mamoeiro (*Carica papaya*), goiabeira (*Psidium guajava*) e mangueira (*Mangifera indica*). Para tanto, foram analisadas amostras de solo, raízes (e tubérculos, no caso da mandioca), caules, galhos, brotos, folhas e frutos, utilizando a técnica de espectroscopia da radiação gama. Essas análises foram feitas com a utilização de detectores de NaI(Tl) e HPGe, disponíveis no Laboratório de Radioecologia (LARA) do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (IF-UFF).

Os resultados mostraram que as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K foram maiores nos compartimentos de crescimento (cascas, brotos, folhas e frutos) que na parte interna do caule principal para as mandioqueiras, goiabeiras e mangueiras, que são árvores lenhosas. No caso das plantas herbáceas (bananeiras e mamoeiros), esses compartimentos de crescimento apresentaram concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K inferiores aos valores obtidos no caule principal.

A partir de análises bidimensionais em cortes transversais do caule principal foi possível observar efeitos de assimetria e heterogeneidade nas distribuições de ^{137}Cs e ^{40}K nos discos de bananeiras e mamoeiros contaminados por césio, cujo efeito não era observado em distribuições radiais convencionais.

Os fatores de concentração (FC) mostraram ser ferramentas importantes na avaliação do acúmulo e transporte destes radionuclídeos, pois a partir deles foi possível observar com maior clareza suas distribuições nos grupos de vegetais estudados.

Foi possível observar que alterações nas propriedades básicas do solo (pH e umidade, por exemplo), podem produzir alterações nos valores de fatores de

concentração (FC), entretanto, os valores do fator de discriminação K/Cs (FD) mostraram ser sempre próximos a unidade para todas as espécies analisadas nesse trabalho. Indicando que céσιο e potássio apresentam comportamentos semelhantes e, portanto, ^{137}Cs pode ser um bom candidato como marcador ou rastreador de íons monovalentes inorgânicos, presentes na nutrição vegetal.

Abstract

Measures were taken to concentration of ^{137}Cs and ^{40}K over different species of tropical plants herbaceous and woody: cassava (*Manihot esculenta*), banana (*Musa paradisiacal*), papaya (*Carica papaya*), guava (*Psidium guajava*), and mango (*Mangifera indica*). For both, were analyzed samples of soil, roots (and tubers, in the case of cassava), stems, twigs, shoots, leaves and fruit, using the technique of spectroscopy of gamma radiation. These analyses were performed with the use of detectors of NaI(Tl) and HPGe, available in the laboratory of Radioecology (LARA) of the Institute of Physics of the Universidade Federal Fluminense (IF-UFF).

The results showed that concentrations of ^{137}Cs and ^{40}K were higher in the compartments of growth (bark, buds, leaves and fruit) that the inner part of the main stem for cassava, guava and mango trees, which are woody trees. In the case of herbaceous plants (banana and papaya), these compartments of growth showed concentrations of ^{137}Cs and ^{40}K lower than the values obtained in the main stem.

From two-dimensional analysis on transversal sections of main stem was possible to observe effects of asymmetry and heterogeneity in the distribution of ^{137}Cs and ^{40}K on the disks of banana and papaya plants contaminated by caesium, whose effect was not observed in conventional radial distributions.

The concentration factors (FC) shown to be important tools in the evaluation of the accumulation and transport of radionuclides, because from them was possible to see more clearly their distributions in groups of plants studied.

It was observed that changes in the basic properties of soil (pH and humidity, for example), can produce changes in the values of concentration factors (FC), however, the values of the discrimination factors K/Cs (FD) showed always be coming the unit for all

species analyzed in this work. Indicating that potassium and caesium have similar behaviors, and therefore ^{137}Cs can be a good candidate as a marker or crawler monovalent inorganic ions, present in plant nutrition.

*" A glória é tanto mais tardia quanto mais duradoura há de ser,
porque todo o fruto delicioso amadurece lentamente."
(Arthur Schopenhauer)*

Sumário

1 Introdução	1
2 Materiais e métodos	6
2.1 Coletas das amostras	7
2.1.1 Mandioqueiras (<i>Manihot esculenta crantz</i>)	10
2.1.2 Bananeiras (<i>Musa paradisiaca</i>)	13
2.1.3 Mamoeiros (<i>Carica Papaya</i>)	15
2.1.4 Goiabeiras (<i>Psidium guajava</i>)	17
2.1.5 Mangueira (<i>Mangifera indica</i>)	20
2.2 Preparo das amostras	22
2.3 Arranjo experimental	23
2.3.1 A blindagem	24
2.3.2 Detector de iodeto de sódio – NaI(Tl)	25
2.3.3 Detector de germânio hiper-puro (HPGe)	32
2.3.4 Propriedades gerais dos detectores	34
2.3.4.1 Resolução em energia	35
2.3.4.2 Eficiência de detecção	37
2.4 Sistema de aquisição de dados e cálculo das concentrações	41
2.4.1 Calibração em energia	41
2.4.2 Cálculo das concentrações e estimativas de suas incertezas	44
2.4.3 Limite inferior de detecção (LID)	46

3 Acúmulo e distribuição de sais minerais em vegetais	49
3.1 Absorção de ^{137}Cs e ^{40}K pelas raízes dos vegetais.	50
3.2 Fator de transferência solo-planta	53
3.2.1 Fator de transferência solo-raiz – Competição entre Cs^+ e K^+	54
3.2.2 Fator de transferência solo-compartimento	57
3.3 Distribuição e transporte de césio e potássio nos vegetais	62
3.3.1 Potássio.	62
3.3.2 Césio	63
3.3.3 Taxa de acúmulo entre césio e potássio	65
3.4 Distribuição radial	71
4 Resultados	80
4.1 Propriedades físico-químicas e concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K no solo	81
4.2 Distribuição de ^{137}Cs e ^{40}K no interior das plantas	83
4.2.1 Distribuição longitudinal	85
4.2.1.1 Mandioqueiras	85
4.2.1.2 Bananeiras	97
4.2.1.3 Mamoeiros	101
4.2.1.4 Goiabeiras	109
4.2.1.4 Mangueiras	114
4.2.2 Distribuição radial	117
4.2.2.1 Mamoeiros	117
4.2.2.2 Bananeiras	120
4.3 Correlações de transporte e acúmulo de ^{137}Cs e ^{40}K	121
4.3.1 Fator de concentração (FC)	122

4.3.2 Fator de discriminação K/Cs (FD) 129

4.3.3 Fatores influenciadores nos valores de FC 135

5 Conclusões

139

Lista de figuras

2.1 Taxas de dose nos principais locais do acidente radiológico de Goiânia	8
2.2 Ilustração da mandioqueira MCI	11
2.3 Ilustração da bananeira BC	14
2.4 Ilustração da papaieira PCI.	17
2.5 Ilustração da goiabeira GC	19
2.6 Ilustração da mangueira MC	21
2.7 Esquema do arranjo experimental utilizado no LARA.	24
2.8 Ilustração do funcionamento de um detector cintilador do tipo NaI(Tl)	27
2.9 Ilustração do processo de absorção fotoelétrica	28
2.10 Ilustração do processo de espalhamento compton	29
2.11 Ilustração do processo de produção de pares.	30
2.12 Espectro de energia utilizado um detector de NaI(Tl)	31
2.13 Ilustração do detector de germânio hiper-puro HPGe.	34
2.14 Espectros de energia típicos para detectores HPGe e NaI(Tl)	36
2.15 Reta de calibração em energia	43
3.1 Taxa de absorção de Cs ⁺ em função do aumento da concentração de césio no solo	53
3.2 Valores de FT sobre uma escala de concentração no solo de 10 ⁻⁴ a 10 ⁻² e de 0 a 200 μM de Cs	55

3.3 Concentração de ^{137}Cs e ^{40}K em plantas cultivadas nas Ilhas Marshall em função das concentrações desses elementos no solo	56
3.4 Fator de transferência para ^{137}Cs em função do aumento da concentração de ^{137}Cs na solução no caso de: adição e não adição de potássio na solução	58
3.5 Distribuição de ^{137}Cs em plantas de clima temperado de florestas da Suécia	4
3.6 Valores de concentrações de ^{137}Cs , ^{40}K e $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ em diferentes compartimentos de cebolas	68
3.7 Valores de FT para ^{137}Cs em anéis etários de 7 tipos diferentes de árvores lenhosas e de clima temperado	72
3.8 Valores concentração de ^{137}Cs e ^{40}K em função dos anéis de crescimento.	73
3.9 Valores concentração de ^{40}K e espessura do anel da árvore em função dos anéis de crescimento	74
3.10 Valores concentração de $^{137}\text{Cs}_{\text{Ch}}$, $^{137}\text{Cs}_{\text{TN}}$, ^{40}K em função dos anéis de crescimento da árvore e razões de $^{137}\text{Cs}_{\text{Ch}}$ e $^{137}\text{Cs}_{\text{TN}}$ por ^{40}K em função dos anéis etários	76
3.11 Valores concentração de ^{137}Cs e ^{40}K em função dos anéis de crescimento	77
3.12 Diagrama bidimensional da distribuição radial das concentrações de ^{137}Cs no interior do tronco de uma goiabeira	78
4.1 Figura esquemática das amostras analisadas da mandioqueira MC1.	86
4.2 Figura esquemática das amostras analisadas da mandioqueira MC2.	89
4.3 Figura esquemática das amostras analisadas da mandioqueira MC3.	91
4.4 Figura esquemática das amostras analisadas da mandioqueira MC4.	92
4.5 Figura esquemática das amostras analisadas da mandioqueira MNC1	94
4.6 Figura esquemática das amostras analisadas da mandioqueira MNC2.	95
4.7 Figura esquemática das amostras analisadas da mandioqueira MNC3	96

4.8	<i>Figura esquemática das amostras analisadas da bananeira BC</i>	99
4.9	<i>Figura esquemática das amostras analisadas da bananeira BNC</i>	99
4.10	<i>Figura esquemática das amostras analisadas da papaieira PCI</i>	103
4.11	<i>Figura esquemática das amostras analisadas da papaieira PC2</i>	103
4.12	<i>Figura esquemática das amostras analisadas da papaieira PNC</i>	103
4.13	<i>Gráfico das concentrações de ^{40}K nas folhas e nos talos da papaieira PCN em função dos locais de coletas de amostra de folhas</i>	108
4.14	<i>Figura esquemática das amostras analisadas na goiabeira GC</i>	110
4.15	<i>Figura esquemática das amostras analisadas na goiabeira GNC1</i>	112
4.16	<i>Figura esquemática das amostras analisadas na goiabeira GNC2</i>	113
4.17	<i>Figura esquemática das amostras analisadas na mangueira MC</i>	116
4.18	<i>Diagrama bidimensional das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K na papaieira contaminada PCI</i>	118
4.19	<i>Diagrama bidimensional das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K na papaieira contaminada PC2</i>	119
4.20	<i>Diagrama bidimensional das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K na bananeira contaminada BC</i>	121
4.21	<i>Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para as mandioqueiras contaminadas</i>	130
4.22	<i>Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para a papaieira contaminada PCI</i>	131
4.23	<i>Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para a bananeira contaminada BC</i>	132
4.24	<i>Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para a goiabeira contaminada GC</i>	133

4.25 <i>Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para a mangueira contaminada MC</i>	134
4.26 <i>Fatores de Concentração (FC) em função dos compartimentos para as goiabeiras contaminadas e a mangueira contaminada num trabalho anterior e nesse trabalho</i> .	137
4.27 <i>Fator de Discriminação (FD) em função dos compartimentos para as goiabeiras contaminadas a mangueira contaminada num trabalho anterior e nesse trabalho</i> . . .	138

Lista de Tabelas

3.1 Valores do FT para Cs de macieiras em diferentes tipos de solo, contaminação e experimento	61
3.2 Valores de concentração para ^{137}Cs para duas goiabeiras, uma mangueira e um abacateiro divididos em partes jovens e partes velhas	66
3.3 Valores de TAC em diferentes tipos de plantas	70
4.1 Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K , granulometria, pH e K^+ nas amostras de solos onde foram cultivadas as plantas estudadas nesse trabalho	82
4.2 Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mandioqueira MC1	86
4.3 Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mandioqueira MC2	89
4.4 Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mandioqueira MC3	91
4.5 Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mandioqueira MC4	92
4.6 Valores de concentração de ^{40}K na mandioqueira MNC1	94
4.7 Valores de concentração de ^{40}K na mandioqueira MNC2	95
4.8 Valores de concentração de ^{40}K na mandioqueira MNC3	96
4.9 Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na bananeira BC	98
4.10 Valores de concentração de ^{40}K na bananeira BNC	100
4.11 Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na papaieira PCI	102
4.12 Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na papaieira PC2	104
4.13 Valores de concentração de ^{40}K na papaieira PNC	107
4.14 Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na goiabeira GC	111

4.15	<i>Valores de concentração de ^{40}K na goiabeira GNC1</i>	112
4.16	<i>Valores de concentração de ^{40}K na goiabeira GNC2</i>	113
4.17	<i>Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mangueira MC</i>	115
4.18	<i>Valores de Fatores de Concentração (FC) nas mandioqueiras contaminadas e na mandioqueira MNC3</i>	124
4.19	<i>Valores de Fatores de Concentração (FC) para as papaieiras PCI e PNC</i>	125
4.20	<i>Valores de Fatores de Concentração (FC) para as bananeiras BC e BNC</i>	126
4.21	<i>Valores de Fatores de Concentração (FC) para as goiabeiras GC, GNC1 e GNC2</i>	127
4.22	<i>Valores de Fatores de Concentração (FC) para a mangueira MC</i>	128

Capítulo 1

Introdução

O ponto de partida para a introdução em larga escala de elementos radioativos artificiais no meio ambiente iniciou-se através de uma corrida tecnológica e armamentista denominado de *Projeto Manhattan*. Este culminou com desenvolvimento e uso militar das primeiras armas nucleares, incluindo a maior catástrofe da história: o terror vivido nas cidades de Hiroshima e Nagasaki em agosto de 1945. No pós-guerra, foram mais de 20 anos de testes nucleares realizados pelos Estados Unidos e União Soviética, em virtude da competição pela liderança mundial ocorrida no período da Guerra Fria. Posteriormente, o desenvolvimento de reatores nucleares, combustíveis nucleares e a produção de armamentos mantiveram a liberação de uma grande quantidade de rejeitos radioativos no meio ambiente, contaminando desde locais específicos até todo o planeta Terra [Whicker et al., 1999].

Outros aspectos que influenciam na incorporação de material radioativo artificial no meio ambiente foram os acidentes provocados por reatores de usinas nucleares, como foram os de Three Mile Island em 28 de março de 1979 na Pensilvânia (EUA) e em Chernobyl em 26 de abril de 1986, cidade ao norte da Ucrânia. Este último liberou uma nuvem radioativa contaminando pessoas, animais e uma vasta extensão da Europa [IAEA, 1992]. No Brasil, em 13 de setembro de 1987, aconteceu o maior acidente radiológico do mundo até hoje registrado. A contaminação de alguns locais da cidade de Goiânia ocorreu devido à abertura de uma cápsula contendo $^{137}\text{CsCl}$, proveniente de um

equipamento de radioterapia, que estava desativado numa clínica médica abandonada [Facure et al., 2001; Anjos et al., 2002]. Embora esse tipo de acidente tenha uma escala de importância menor do que acidentes nucleares, a liberação desse material no solo em Goiânia resultou na morte de quatro pessoas e em cerca de 3500m² de rejeito radioativo [IAEA, 1988; HP, 1991].

Com isso, a influência da radioatividade no meio ambiente tem sido muito estudada nas últimas seis décadas, através da introdução de uma nova linha de pesquisa científica, que trata da compreensão da transferência de substâncias radioativas entre ecossistemas terrestres e marinhos para os organismos vivos, incluindo seus efeitos biológicos nos seres humanos: a Radioecologia. Linha multidisciplinar, a qual faz uma ponte entre a Física Nuclear e suas aplicações em outras áreas, tais como a biologia, química, geologia, medicina, oceanografia, entre outras. Assim, métodos analíticos nucleares, baseado no uso de elementos radioativos naturais e artificiais, são utilizados como ferramentas na compreensão fenômenos específicos dentro das áreas de interesse.

O ¹³⁷Cs, produzido artificialmente pela fissão do urânio ou plutônio, é um dos elementos mais estudados por se tratar de radioisótopo de meia-vida longa, da ordem de 30 anos. Assim, vários estudos têm sido realizados desde a década de 50, a fim de compreender o comportamento desse elemento no solo. Quando depositado no meio ambiente, seja por acidentes radiológicos ou nucleares, este radionuclídeo possui a propriedade de misturar-se facilmente a outros elementos naturais na forma de íons, podendo ser absorvido pelas raízes das plantas. Dentre estes estudos, podem ser citados aqueles que visam elaborar mecanismos eficientes de recuperação de solos agrícolas e florestais, no sentido de minimizar a transferência de ¹³⁷Cs para a cadeia alimentar [Zhu & Smolders, 2000]. Por se tratar de um cátion monovalente (Cs⁺) e, portanto, possuir

propriedades físico-químicas semelhantes ao potássio (K^+), alguns trabalhos tem relatado que o potássio, quando usando como fertilizante, possui a capacidade de inibir a absorção de ^{137}Cs pelas raízes das plantas quando este estiver presente no solo [Zhu & Smolders, 2000; Zhu et al., 2002]. Entretanto, o grau de semelhança entre estes elementos é um problema complexo, necessitando sua investigação em diversas configurações do ecossistema envolvido.

Para tanto, análises do ciclo biogeoquímico do ^{137}Cs têm sido realizadas principalmente nas florestas européias de clima temperado em decorrência do acidente de Chernobyl [Bell & Shaw, 2005]. Os resultados experimentais para árvores lenhosas têm indicado que o céσιο possui alta mobilidade no interior de seus compartimentos, tendendo a acumular-se em maior quantidade nos órgãos de crescimento da planta, como frutos, folhas, brotos ou galhos e na casca dos troncos. Por exemplo, Funel e colaboradores (1995) ao analisar coníferas de diferentes espécies, tais como pinheiros (*Pinus silvestris* e *Pinus picea*) e lariço (*Larix*), observaram que as concentrações de ^{137}Cs encontradas nos compartimentos aéreos dessas árvores eram maiores que no interior do tronco principal, indicando que o maior acúmulo acontecia nas extremidades onde ocorrem os processos de fotossíntese e respiração. As concentrações de ^{137}Cs nas cascas dos troncos eram cerca de uma a duas ordens de grandeza maiores que os valores encontrados na parte interna correspondente, sendo ainda que as concentrações nas folhagens e brotos eram de 3 a 17 vezes superiores. Fogh e Anderson (2001) obtiveram resultados semelhantes em pinheiros, videiros e carvalhos, encontrando concentrações de ^{137}Cs nos compartimentos de crescimento em até uma ordem de grandeza superior aos compartimentos mais velhos dessas árvores. Contudo, informações sobre distribuições de potássio em plantas de clima temperado são escassas.

Dentro do interesse do tema desta dissertação de mestrado, o nosso Grupo de Pesquisa já realizou trabalhos anteriores em árvores frutíferas tropicais cultivadas nos locais do acidente de Goiânia, investigando distribuições de ^{137}Cs e ^{40}K . Os resultados têm apontado que as concentrações destes elementos nos compartimentos de crescimento de limoeiros, laranjeiras, pimenteiras, goiabeira e mangueiras são de 2 a 7 vezes maiores do que nos compartimentos mais antigos dessas espécies de lenhosas tropicais [Mosquera et al., 2006; Carvalho et al., 2006; Anjos et al., 2008]. Revelando que as distribuições destes elementos em árvores frutíferas tropicais não necessariamente seguem o mesmo modelo de árvores lenhosas de clima temperado. Este resultado também desperta o interesse de se estudar outras espécies de plantas tropicais, tais como as herbáceas. Adicionalmente, também há o interesse de se aprofundar o conhecimento sobre o comportamento de cátions monovalentes inorgânicos que se constituem como alguns dos principais nutrientes vegetais, tais como o amônio (NH_4^+), sódio (Na^+) e potássio (K^+). O amônio é um mediador central no metabolismo de nitrogênio pela planta. Uma importante função do potássio no interior das plantas está em ajustar a pressão osmótica das células, estando, então, diretamente ligado ao crescimento da planta. Algumas plantas podem substituir altas concentrações de potássio por sódio, uma vez que concentrações elevadas desse elemento dentro das células provocam um aumento significativo na quantidade de água no seu interior, fazendo com essas células sofram expansão, tendo um efeito no crescimento que não poderia ser alcançado simplesmente com o aumento do índice de K^+ [Marschner, 1995]. Desta forma, o estudo do ^{137}Cs é potencialmente mais proveitoso que apenas para a radioecologia, uma vez que é interessante avaliar seu potencial como um marcador para a nutrição vegetal.

Assim, este trabalho visa o estudo das correlações entre as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K ao longo de plantas tropicais de diferentes espécies, tais como árvores frutíferas lenhosas, herbáceas e plantas perenes composta de tubérculos. Para tanto, foram analisadas goiabeiras (*Psidium guajava*), mangueiras (*Mangifera indica*), bananeiras (*Musa paradisiaca*), mamoeiros (*Carica papaya*) e mandioqueiras (*Manihot esculenta*).

No capítulo 2 serão descritos os métodos de coleta e preparação de amostras e análise de dados, bem como as ferramentas e equipamentos experimentais utilizados para essas tarefas. No capítulo 3 serão descritos os principais mecanismos de transporte e acúmulo de nutrientes e as possíveis correlações entre as concentrações de ^{40}K e ^{137}Cs , existentes na literatura. No capítulo 4 serão apresentadas as discussões e interpretações dos resultados encontrados e por fim, no capítulo 5, serão apresentadas as principais conclusões dessa dissertação de mestrado.

Capítulo 2

Materiais e métodos

Para que seja possível compreender os mecanismos de absorção, transporte e acúmulo de radionuclídeos no interior das plantas é necessário, inicialmente, estimar os valores de suas concentrações nos compartimentos de cada planta, tais como raízes, tronco, galhos, folhas e frutos. Em alguns casos, também é importante realizar uma análise temporal do acúmulo e distribuição de radioisótopos em alguns órgãos das plantas, como por exemplo, estimar a variação da concentração de um dado elemento em função da evolução do processo de formação e/ou maturação de frutos, folhas, galhos etc. Para tanto, amostras são coletadas e levadas a um laboratório para posterior análise.

Nesse capítulo, serão descritos os métodos e materiais utilizados na coleta, preparo e análise das amostras estudadas neste trabalho, visando à obtenção de suas respectivas concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K . Todos estes procedimentos foram realizados no Laboratório de Radioecologia (LARA) do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (IF-UFF), utilizando-se a técnica de espectrometria da radiação gama. Para garantir a confiabilidade nos valores encontrados, estes procedimentos foram realizados seguindo-se normas internacionais [IAEA, 1989; HASL, 1997], possibilitando que os resultados obtidos possam ser comparados com os valores encontrados por outros laboratórios de pesquisas.

2.1 Coletas das amostras

No dia 13 de setembro de 1987 aconteceu no Brasil, mais especificamente na cidade de Goiânia, o pior acidente radiológico do mundo. Uma cápsula contendo material radioativo, com atividade de ^{137}Cs estimada em 50.9 TBq (1375 Ci), foi indevidamente aberta por moradores da região que, por desconhecerem os riscos provenientes da radiação, proporcionaram a contaminação de alguns locais da região central da cidade de Goiânia [IAEA, 1988; Health Physics, 1991].

A Figura 2.1 apresenta histogramas, obtidos em abril de 2007, para as taxas de dose, calculadas a um metro do solo, utilizando-se um detector portátil do tipo Geiger Muller, em quatro dos principais locais afetados pelo acidente: a) Antiga *casa do Roberto dos Santos Alves*, situada na Rua 57, nº 58, Setor Aeroporto; b) antigo *Ferro Velho I*, situado na Rua 26A, Bloco Z, Lote 30, Setor Aeroporto; c) no lote dos *fundos do antigo Ferro Velho I*, local onde residia Edson Fabiano e; d) no antigo *Ferro Velho II*, situado na Rua 6, quadra Q, lote 18 do Setor Ferroviário da cidade de Goiânia. De acordo com seus resultados, é possível observar que embora seus centróides apresentem valores inferiores a $1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ (valor máximo de dose recomendado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN em que a população em geral pode ser submetida após a descontaminação de um local acidentado [IAEA, 1988]), eles encontram-se acima de $60 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$, que é o valor médio da radiação de fundo da cidade de Goiânia [Anjos *et al.*, 2002]. Desta forma, estes resultados indicam que ainda hoje é possível encontrar vestígios de ^{137}Cs nestes locais do acidente radiológico.

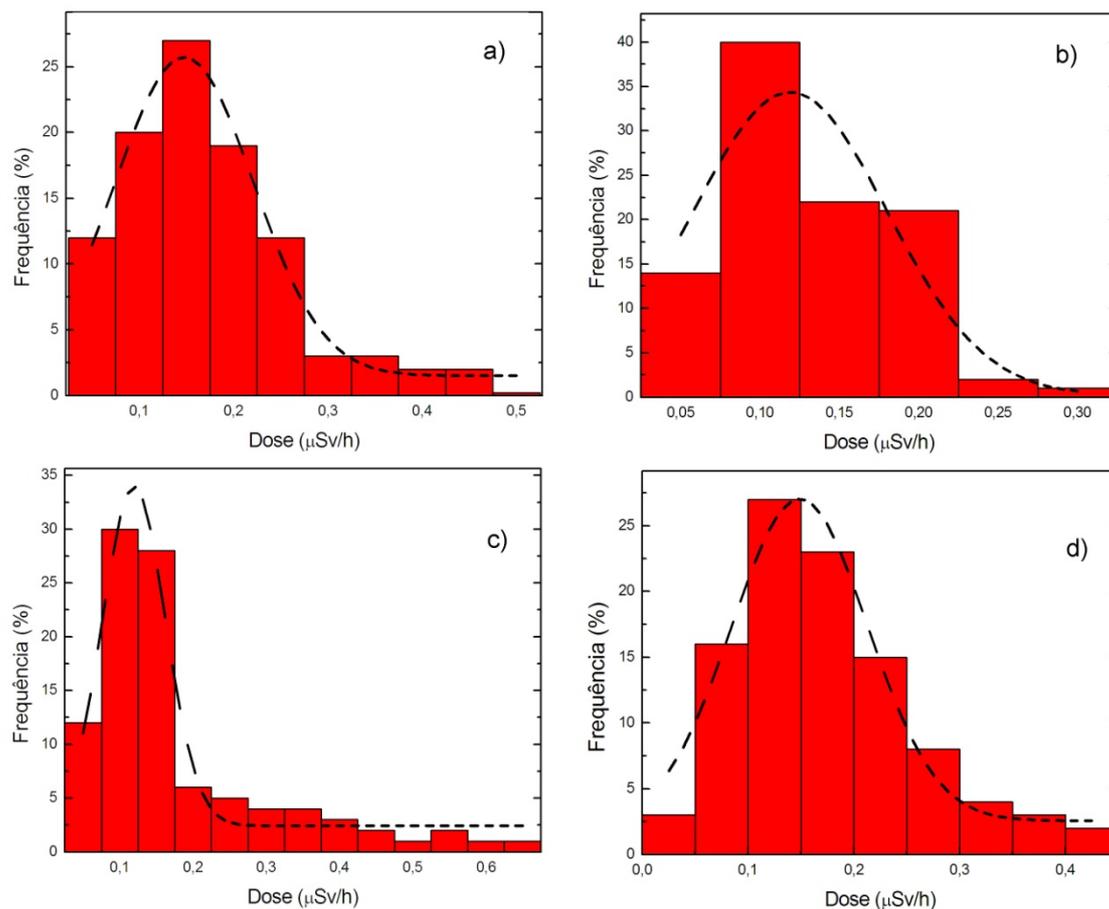


Figura 2.1: Histogramas de taxas de dose nos principais locais do acidente radiológico de Goiânia, obtidos em abril de 2007 para: **a)** Casa do Roberto, **b)** Ferro velho I, **c)** Fundos do Ferro Velho I e, **d)** Ferro Velho II.

Após a intervenção e descontaminação realizada pela CNEN em 1987, o *Ferro Velho II*, foi liberado para ser utilizado como depósito de materiais recicláveis e moradia para cinco de seus trabalhadores, os quais realizam o cultivo de árvores frutíferas, hortaliças e outros tipos de agricultura de subsistência. Com isso, esse local tornou-se um excelente laboratório ao ar livre para a observação de plantas que contêm ^{137}Cs . Embora este local tenha sido concretado em agosto de 2001 pela CNEN, como resultado de um trabalho de pesquisa realizado pelo nosso Grupo [Facure *et al.*, [2001a; Facure *et al.*, 2001b; Facure, 2001c; Anjos *et al.*, 2002], ainda assim, é possível coletar amostras

de vários compartimentos de plantas tropicais, as quais propiciaram a realização desta dissertação de mestrado.

Trabalhos anteriores realizados pelo LARA na área de radioecologia permitiram avaliar como diferentes tipos de plantas comportam-se na presença e na ausência de ^{137}Cs no solo. Entretanto, estes trabalhos enfocaram o estudo de árvores frutíferas tropicais e lenhosas, tais como goiabeiras, abacateiros, romãzeiras, mangueiras e pimenteiras [Carla *et al.*, 2006; Mosquera *et al.*, 2006]. Assim, com o objetivo de compreender as correlações entre ^{137}Cs e alguns nutrientes vegetais, este trabalho teve como objetivo avaliar, principalmente, outras espécies de plantas tropicais, tais como:

- 1) mandioqueiras: árvore da família das *Euphorbiaceae*, que apesar de ser lenhosa não é frutífera;
- 2) bananeiras: planta *Herbácia vivaz acaule* das espécies do gênero *Musa*, que apesar do seu porte não é considerada uma árvore;
- 3) mamoeiros: árvores das espécies do gênero *Carica*, especialmente de *Carica Papaya*;
- 4) Goiabeiras: árvores da espécie *Psidium guajava*, da família *Myrtaceae*. Novas medidas para este tipo de planta tiveram o objetivo de aprofundar estudos já realizados pelo nosso grupo.

Concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K foram obtidas em vários órgãos ou compartimentos das plantas, tais como raízes, caules, galhos, brotos, folhas e frutos. Adicionalmente, foram coletadas amostras do solo ao redor de onde cada planta esta sendo cultivada. Uma vez que a proposta deste trabalho é a avaliar se o Césio pode ou não ser usado como um traçador ou marcador da presença de potássio no interior dessas plantas, foram analisadas amostras de plantas contaminadas e não-contaminadas por ^{137}Cs . Este procedimento também permite avaliar se a presença de ^{137}Cs na planta produz alguma

alteração na absorção e na distribuição de potássio pela mesma. Em outras palavras, se há algum mecanismo de competição entre esses elementos.

A seguir será feita uma descrição de cada uma das plantas analisadas e como suas amostras foram obtidas.

2.1.1 Mandioqueiras (*Manihot esculenta crantz*)

Mandioqueiras são arbustos (pequenas árvores), que segundo pesquisas recentes teriam tido sua origem no oeste do Brasil (sudoeste da Amazônia) e que antes da chegada dos europeus à América já estaria disseminada como cultivo alimentar até a Guatemala e México. Sua raiz produz um tubérculo (parte comestível da planta), chamado de mandioca, aipim ou macaxeira, dependendo da região do Brasil. Existem diversas espécies dessa planta, que se dividem em mandioca-doce e mandioca-brava (ou mandioca-amarga, devido à presença de ácido cianídrico, que é venenoso se não for destruído pelo calor do cozimento ou do sol). No Brasil, a mandioca é consumida principalmente na forma de farinha e em pedaços fritos ou cozidos [Embrapa, 2007].

Neste trabalho, foram analisadas amostras das partes comestíveis, folhas, galhos, caules e raízes de sete mandioqueiras. Quatro delas foram cultivadas nos fundos do antigo *Ferro Velho II*, às margens do córrego Capim Puba, estando, portanto, sujeitos à contaminação por ^{137}Cs . Estas são as mandioqueiras: MC1, MC2, MC3 e MC4. Os outros três pés de mandioca (MNC1, MNC2 e MNC3) foram cultivados em Niterói, RJ, sendo consideradas, portanto, não-contaminadas por ^{137}Cs , uma vez que efeitos de *fallout* nuclear no Brasil são considerados desprezíveis, quando comparado com a contaminação devido ao acidente radiológico de Goiânia. A Figura 2.2 apresenta a ilustração de uma dessas plantas.

Essas mandiogueiras foram plantadas todos no mesmo período, com idade de aproximadamente um ano quando foram coletados. MC1 tinha 2,30 m de altura, suas raízes comestíveis ou tubérculos eram compostos de 4 mandiocas, sendo 3 com cerca de 10 cm e 1 maior com 54 cm. Ela foi dividida em 16 amostras de caule, 8 amostras de folhas, 6 amostras de raízes (3 de suas cascas e 3 da parte interna) e 8 amostras de tubérculos (sendo 1 para cada mandioca menor e a 5 da mandioca de 54 cm, que esta última foi subdividida em 3 amostras da parte comestível, 1 da casca e 1 de sub-casca, nome dado a uma película abaixo da casca que envolvia a parte comestível da mandioca). A análise de MC1 totalizou em 38 amostras.

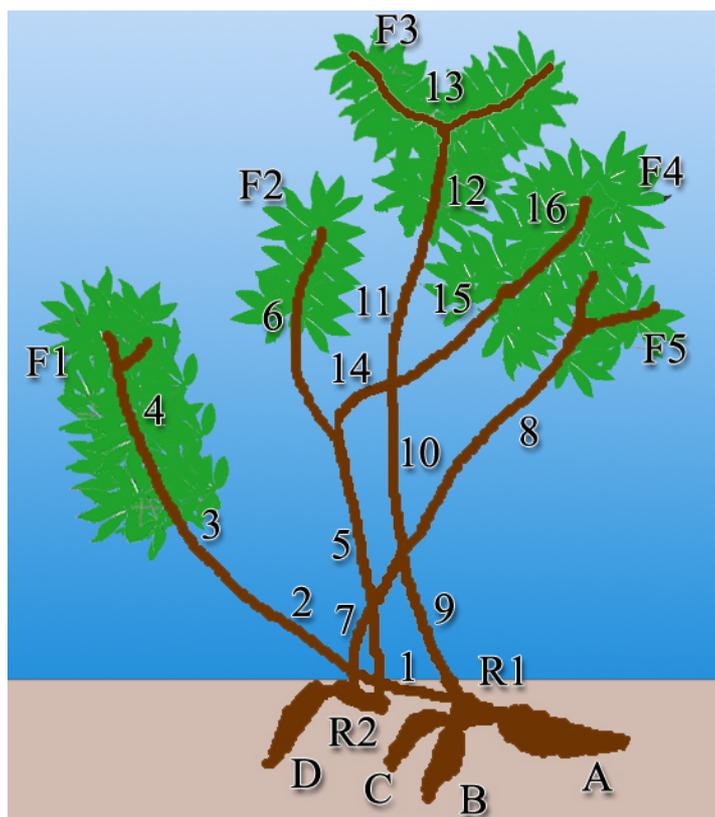


Figura 2.2: Ilustração da Mandioqueira MC1, a qual indica a posição de coleta das amostras de folhas, galhos, caule, raiz e tubérculos.

A mandiogueira MC2 media aproximadamente 1,6 metros de altura. MC2 foi dividida em 11 amostras do seu caule, 2 amostras de folhas, 4 amostras de raízes e 12 amostras

de mandiocas, referentes a dois tubérculos. Um bastante grande, que totalizou 8 amostras e, outro menor, onde originou as outras 4 amostras. MC2 proporcionou um total de 29 amostras analisadas.

As mandiqueiras MC3 e MC4 apresentavam cerca 1,8 m de altura. MC3 propiciou a análise em 28 amostras, sendo 13 amostras de caule (3 amostras de casca e 10 amostras da parte interna), 4 amostras de tubérculos (2 de casca e 2 das partes comestíveis), 2 amostras de raízes (1 de casca e 1 da parte interna) e 2 amostras de folhas. Para a mandioqueira MC4, foram analisadas 17 amostras de caule (entre casca e interior) 13 amostras de tubérculos (4 de casca e 7 da parte interna), 1 amostra de raiz e 1 amostra de folhas.

A mandioqueira não-contaminada MNC1 apresentava um porte pequeno com aproximadamente 1 metro de altura. Era uma árvore jovem com cerca de 8 meses de idade. Para essa planta foram analisadas 7 amostras (1 do tubérculo, 1 de raiz, 4 do caule e 1 de folha). Não foi possível analisar amostras de cascas dessa planta, devido a sua pequena estatura.

A mandioqueira MNC2 apresentava cerca de 1 metro e meio de altura, com um ano de idade. Para esta planta foram analisadas 21 amostras: 4 de tubérculo (2 de cascas e 2 de parte interna), 2 de raízes (1 para a casca e outra para o interior), 12 amostras de caule (sendo que 3 dessas eram de casca e as demais do interior) e 3 amostras de folhas.

MNC3 tinha um porte semelhante ao da MNC2. Para esta planta, foram analisadas 22 amostras: 11 amostras de mandioca (sendo 6 da parte interna e 5 de suas cascas) 2 de raízes (1 de casca e 1 da parte interna), 7 amostras de caule (sendo que 2 delas eram de cascas e 5 da parte interna) e, por fim, 1 amostra de folha.

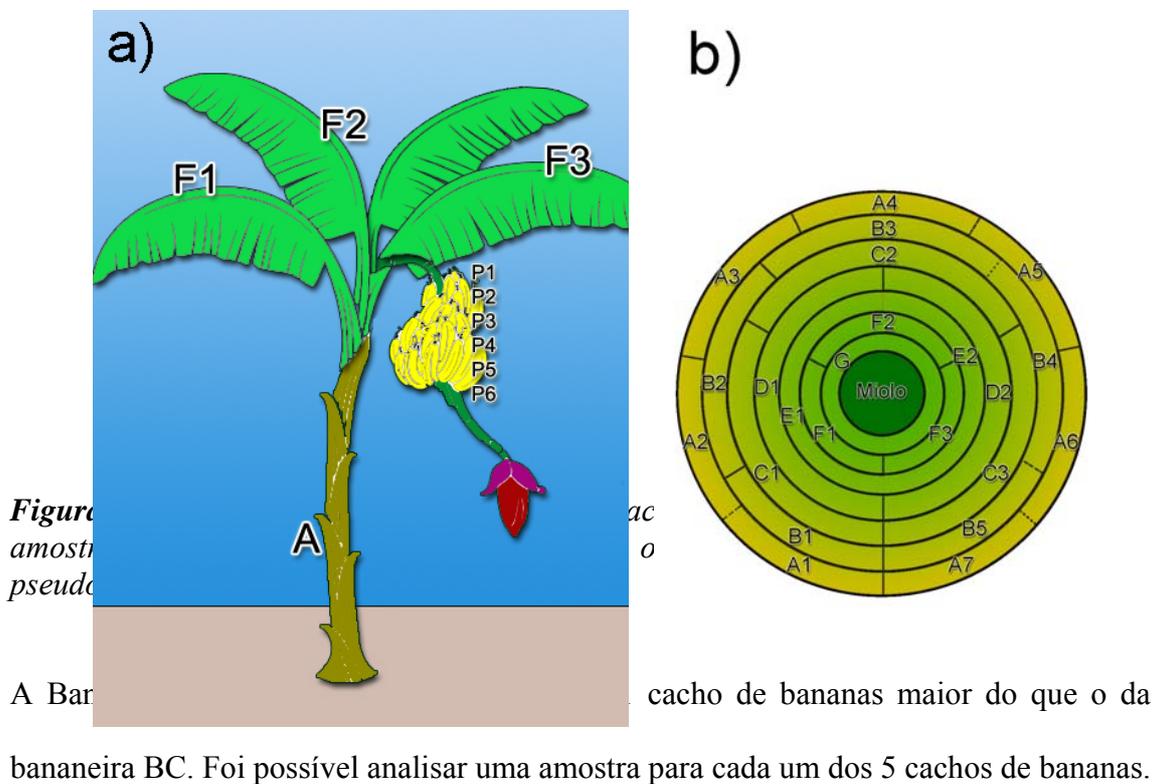
2.1.2 Bananeiras (*Musa paradisiaca*)

As bananeiras tiveram sua origem no sudeste da Ásia, na região ocupada atualmente pela Malásia, Indonésia e Filipinas. Ainda hoje existem muitas variedades de bananas selvagens nessa região, que ao todo resultam em cerca de 50 espécies do gênero *Musa* [Denham *et al.*, 2007]. Essa planta caracteriza-se por um caule suculento e subterrâneo (rizoma), cujo "falso" tronco (um pseudocaule) é formado pelas bainhas superpostas das suas folhas. O "fruto", conhecido como banana, é, na verdade, uma pseudobaga (um tipo de pseudofruto que se encontra em algumas espécies vegetais com ovário ínfero). As pseudobagas formam-se em conjuntos, que agrupam até cerca de vinte bananas em "pencas". Os cachos de bananas, pendentes na extremidade do falso caule da bananeira, podem ter 5 a 20 pencas e podem pesar de 30 a 50 kg. Cada banana pesa em média 125 g, com uma composição de 75% de água e 25% de matéria seca. As bananeiras são uma fonte apreciável de vitamina A, vitamina C, fibras e potássio [Manica,1998].

Neste trabalho foram analisadas duas bananeiras, designadas de BC e BNC. Ambas possuíam cerca de 3 m de altura e um ano de idade. A bananeira contaminada BC foi cultivada no fundo do lote do antigo *Ferro Velho II*, às margens córrego Capim Puba. A bananeira não-contaminada BNC foi cultivada em Niterói (RJ). Além da análise dos vários compartimentos destas plantas, as amostras do caule foram subdivididas em função dos seus anéis de crescimento. A Figura 2.3 apresenta uma ilustração destas bananeiras, destacando como as amostras de caule foram coletadas em função de anéis de crescimento.

A Bananeira BC possuía um cacho com 6 pencas de bananas. Cada penca tinha em média 20 bananas. Foi possível analisar 6 amostras de casca, uma para cada penca e

3 amostras de polpa, uma para cada 2 pencas. Além disso, essa bananeira originou 7 amostras de folhas, 7 amostras dos talos das folhas. Do pseudocaule foram retirados dois discos: um na base e outro a meia altura da planta. O disco da base possuía 21 cm de altura e 30 cm de diâmetro. O segundo disco tinha 26 cm de altura com 25 cm de diâmetro. Esses discos são formados pelas bainhas das folhas que se justapunham num talo central (miolo), que nada mais era do que um prolongamento do verdadeiro caule (subterrâneo) por onde se dava o transporte dos nutrientes. Cada volta completa de um disco era formada por 2 a 4 bainhas das folhas, as quais foram separadas e deram origem a uma amostra individual. Amostras do miolo também foram analisadas. Assim, para o disco da base foram totalizadas 26 amostras (sendo 23 de folhas e 3 da parte central do caule). Para o segundo disco foram analisadas 23 amostras (sendo 22 de folhas e 1 da parte central do caule).



Além disso, também foram analisadas 3 amostras dos talos das bananas além do “coração”. Essa parte fica no final do cacho de bananas, tem uma cor roxa e possui a forma de um elipsóide. Esse “coração” é formado por camadas que possuem pequenas flores no interior de cada camada. Essas seriam futuras bananas e formariam outras pencas posteriormente. Essa parte da BNC originou 5 amostras sendo duas das camadas do “coração” e 3 das flores. Foram analisadas ainda 2 amostras de folhas e 3 amostras de talos de folhas. Do pseudocaule dessa bananeira foi analisado um disco de aproximadamente 28 cm de altura com 29 cm de diâmetro. Esse disco originou 24 amostras, sendo 22 das folhas externas e 2 do miolo.

2.1.3 Mamoeiros (*Carica Papaya*)

Mamão, papaia ou ababaia correspondem aos nomes dados ao fruto do mamoeiro (ou papaieira). Estas árvores, que tiveram sua origem no sul do México e países vizinhos, são cultivadas, atualmente, na maioria dos países tropicais e nos Estados Unidos. Em geral, utiliza-se o nome mamão (ou mamoeiro) para identificar o fruto mais alongado e mais adocicado, já papaia (ou papaieira) corresponde ao fruto mais arredondado. Mamões são consumidos *in natura*, em saladas e sucos. Antes da maturação, sua casca apresenta um látex leitoso que deve ser removido antes do consumo. Este látex contém substâncias nocivas às mucosas, sendo usado, inclusive, culinariamente, como amaciante de carnes. Tem um alto teor de papaína, uma enzima proteolítica usada em medicamentos para tratamento de distúrbios gastrintestinais e para reabsorção de hematomas. O consumo do mamão é recomendado pelos nutricionistas por se constituir em um alimento rico em licopeno (média de 3,39 mg em 100 g),

vitamina C e minerais importantes para o organismo. Quanto mais maduro, maior é concentração desses nutrientes [Morton, 1987].

Foram analisados amostras de frutos, folhas, troncos, cascas e raízes de três papaieiras, designadas por PC1, PC2 e PNC. PC1 e PC2 foram cultivadas no fundo do terreno do antigo *Ferro Velho II* e PNC foi cultivada em Niterói (RJ).

A papaieira contaminada PC1 possuía aproximadamente de 2,5 m de altura, um ano e meio de idade e seu caule apresentava 15 cm de diâmetro em sua parte mais grossa. Durante o processo de preparação de amostras, seu tronco principal foi dividido em 3 secções transversais ou discos, com o objetivo de proporcionar uma análise radial das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K nos vários discos de seu caule. Cada disco resultou em 12 amostras, sendo 4 do interior e 8 da casca externa. Além disso, foram analisados 7 frutos (divididos em casca e polpa, totalizando 22 amostras), 7 amostras de folhas e talos e 16 de raízes. A Figura 2.4 apresenta uma representação esquemática desta planta, incluindo uma ilustração da seção reta de um dos discos do caule, onde pode ser observada a divisão das amostras para a análise radial no tronco do mamoeiro.

Já a papaieira PC2 era pequena e não possuía nem frutos e nem folhas com massas suficientes para serem analisados. Com cerca de 1,5 m de altura e tronco de 6 cm de diâmetro na parte mais grossa, esse mamoeiro foi dividido em 3 secções transversais para análise radial. Com isso, foram coletadas 41 amostras para essa planta.

A papaieira não-contaminada PNC tinha cerca de 2 anos de idade, possuía aproximadamente 2 metros de altura e o diâmetro maior do seu tronco era em torno de 20 cm. Seu tronco foi dividido em 10 secções (que originaram 204 amostras), além de 37 amostras de folhas, 13 amostras de talo e 9 amostras de frutos. Não possível coletar amostras de raízes, uma vez que ele foi cultivado em um sítio particular.

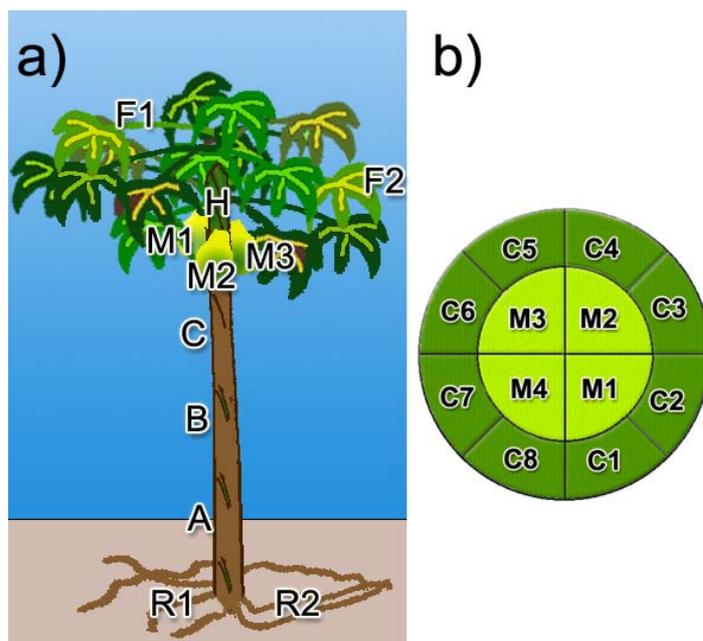


Figura 2.4: a) Ilustração da papaieira PCI; b) corte da seção reta de um dos discos do caule, a qual pode ser observada a divisão das amostras para a análise radial no tronco da papaieira.

2.1.4 Goiabeiras (*Psidium guajava*)

A goiabeira é um arbusto ou árvore pequena nativa de regiões tropicais das Américas, produtora do fruto chamado goiaba. A sua origem é incerta, mas acredita-se que seja originária do sul do México ou da América Central. O fruto é constituído de uma baga, carnosos, casca verde ou amarelada ou roxa, com superfície irregular, com cerca de 8 centímetros de diâmetro. Existem duas variedades de goiaba: a branca, de casca esverdeada e interior amarelo-esverdeado pálido e a vermelha, de casca amarelada e interior rosado. No Brasil, o maior produtor de goiabas vermelhas do mundo, são produzidas frutas para a indústria e para consumo *in natura*, com a maior parte da produção concentrada no estado de São Paulo e no entorno do rio São Francisco (Nordeste), na região das cidades Petrolina/PE e Juazeiro/BA. É utilizada em diferentes produtos derivados, tais como goiabadas, doces, compotas, sucos, sorvetes e molhos

salgados e agridoces. Conhecida por possuir muita vitamina C, apresentando a goiaba vermelha níveis dessa vitamina de 4 a 5 vezes superiores aos da laranja, possui quantidades razoáveis de vitaminas A e do complexo B, além de sais minerais, como cálcio, fósforo e ferro [Morton, 1987].

Neste trabalho, foram analisadas amostras de frutos, folhas, brotos, galhos, tronco principal, cascas e raízes de três goiabeiras. A Goiabeira GC foi cultivada, assim como as outras plantas contaminadas desse trabalho, no antigo *Ferro Velho II*, a 50 metros do córrego Capim Puba. As outras duas goiabeiras, designadas de GNC1 e GNC2, foram cultivadas na cidade de Niterói (RJ).

A Goiabeira GC possuía cerca de 8 anos de idade. Possui cerca de 5 metros de altura para sua análise foi retirado o galho mais próximo ao solo, com um calibre próximo ao do tronco principal. Esse galho foi chamado de tronco principal da goiabeira GC, e os galhos analisados que se ramificavam desse galho formaram as amostras do compartimento dos galhos. A Figura 2.5 mostra um esquema dessa árvore.

Para essa goiabeira foram analisadas 6 amostras do tronco principal, 3 da parte interna e 3 de cascas, 2 amostras de galhos, 1 amostra de talos velhos, 1 amostra de brotos, 1 de brotinhos, 8 amostras de folhas, sendo 3 de folhas velhas, 3 de folhas jovens e 2 de brotinhos, por fim, foram analisadas 2 amostras de frutos jovens. No total foram analisadas 20 amostras dessa árvore.

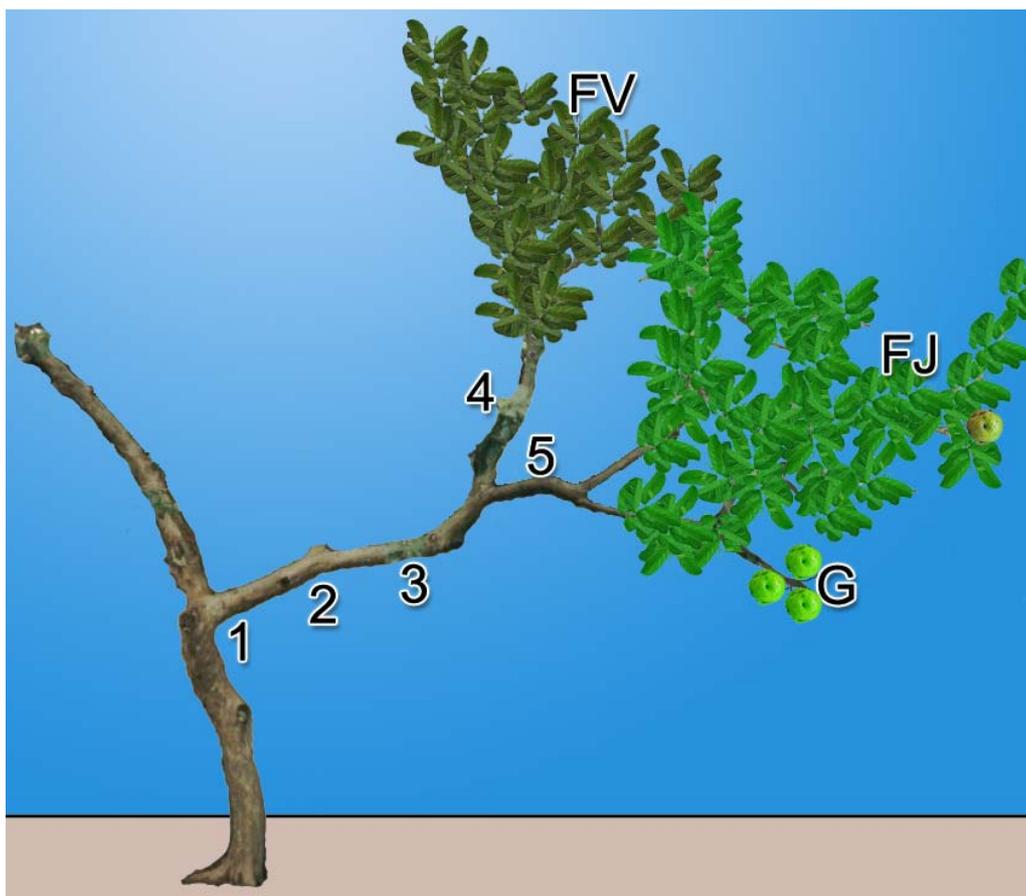


Figura 2.5: Ilustração da goiabeira GC, onde podem ser visto os locais de coletas de amostras de galhos, brotos, folhas e frutos

As goiabeiras não-contaminadas, GNC1 e GNC2, possuíam cerca de 4 anos de idade. A goiabeira GNC1 media em torno de 3 metros de altura enquanto a GNC2 era um pouco menor, com cerca de 2,5 metros. Para a goiabeira GNC1 foram analisadas 12 amostras: 1 de raízes, 2 do tronco principal, sendo 1 de cascas e outra da parte interna, 1 amostra de galhos, 1 de brotos, 2 de folhas, sendo 1 de folhas jovens e outra de folhas velhas, 1 de fruto maduro e 1 amostra de frutos verdes. Já para a goiabeira GD2 foram analisadas 16 amostras: 4 de raízes, 3 do tronco principal, sendo 2 da parte interna e 1 de cascas, 1 amostra de galhos, 1 amostra de brotos e 6 amostras de folhas, sendo 4 de folhas velhas e 2 de folhas novas.

2.1.5 Mangueira (*Mangifera indica*)

A mangueira é uma árvore frutífera cujos frutos são conhecidos como mangas. Estas árvores pertencem ao género *Mangifera*, que inclui cerca de 35 espécies de árvores da família *Anacardiaceae*. Nativas do sul e do sudeste asiático desde o leste da Índia até as Filipinas, e introduzidas com sucesso no Brasil, em Angola, em Moçambique e em outros países tropicais. As mangueiras são grandes árvores, podendo atingir entre 35 e 40 metros de altura, com um raio de copa próximo de 10 metros. Suas folhas são perenes, com entre 15 e 35 centímetros de comprimento e entre seis e 16 centímetros de largura. Quando jovens estas folhas são rosa - alaranjadas. Seu fruto, a manga, é uma fruta de coloração variada: amarelo, laranja e vermelha, sendo mais roseada no lado que sofre insolação direta e mais amarelada ou esverdeada no lado que recebe insolação indireta. A polpa é succulenta e muito saborosa, em alguns casos fibrosa, doce, contendo uma única semente grande no centro. As mangas são usadas na alimentação das mais variadas formas, mas é mais consumida ao natural. Uma manga fresca contém cerca de 15% de açúcar, até 1% de proteína e quantidades significativas de vitaminas, minerais e anti-oxidantes, podendo conter vitamina A, vitamina B e vitamina C. Graças à alta quantidade de ferro que contém, a manga é indicada para tratamentos de anemia e é benéfica para as mulheres grávidas e em períodos de menstruação. Pessoas que sofrem de câimbras, stress e problemas cardíacos, podem se beneficiar das altas concentrações de potássio e magnésio existentes que também auxiliam àqueles que sofrem de acidose. Para esse trabalho, foram analisadas amostras de folhas, brotos, galhos, tronco principal e cascas de uma mangueira cultivada em solo contaminado por ^{137}Cs . Essa mangueira contaminada, denominada MC, também foi cultivada no antigo *Ferro Velho II*, a 50 metros do córrego Capim Puba.

A mangueira MC possuía cerca de 10 anos de idade e cerca de 6 metros de altura. Para sua análise foi retirado o galho mais próximo ao solo, com um diâmetro próximo ao do tronco principal. Esse galho foi denominado tronco principal e os galhos analisados que se ramificavam desse galho formaram as amostras do compartimento dos galhos. A Figura 2.6 mostra um esquema dessa árvore.

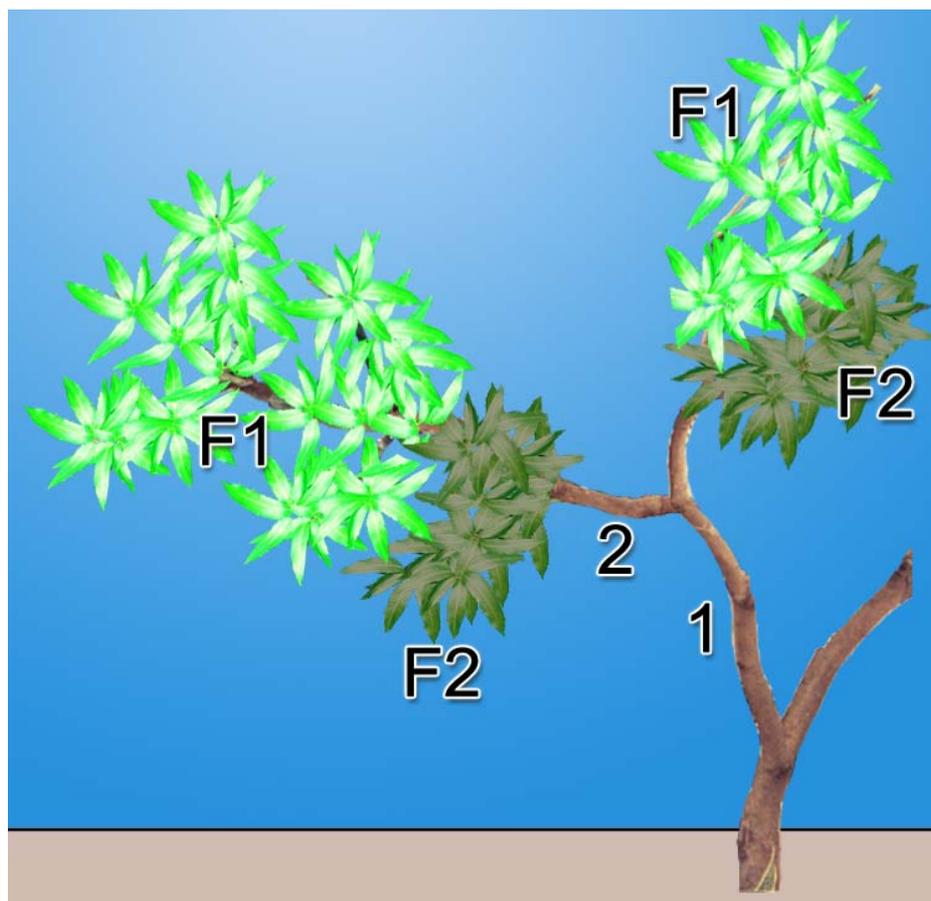


Figura 2.6: Ilustração da mangueira MC, onde podem ser visto os locais de coletas de amostras de galhos, brotos, talos e folhas.

Foram analisadas para essa árvore 2 amostras do tronco principal, sendo 1 da parte interna e outra de casca, 1 amostra de galho, 2 de talos velhos, 2 de brotos e 7 amostras de folhas, sendo 3 de folhas velhas e 4 de folhas jovens.

2.2. Preparo das amostras

O processo de preparo envolveu amostras de solo e de vegetais, o qual seguiu recomendações internacionais [IAEA, 1989]. Assim, as amostras de solo foram inicialmente peneiradas para que fossem retiradas as impurezas contidas na terra, tais como raízes, galhos, folhas secas, pedras etc. Posteriormente, elas foram submetidas a um processo de secagem em uma estufa, onde a temperatura foi mantida ao redor de 110° C. Este procedimento durou, em média, 24 horas. Tempo necessário para que não mais ocorresse variação em sua massa, garantindo, portanto, a remoção da água presente na amostra. Desta forma, a massa de cada amostra pôde ser expressa em unidades de "massa seca", grandeza a qual permite a intercomparação dos resultados obtidos. Em seguida, essas amostras foram trituradas em um moinho analítico e acondicionadas em potes plásticos de geometria cilíndrica. Este procedimento, além de garantir a homogeneidade da amostra, proporciona um maior rendimento em sua ocupação volumétrica e, portanto, mais acurácia na determinação das concentrações dos contaminantes radioativos. Finalmente, os potes foram pesados e lacrados.

Em geral, é importante que estas amostras sejam armazenadas por um período superior a 4 semanas, a fim de que os elementos radioativos gasosos, filhos das séries de decaimento de ^{232}Th e ^{238}U (tal como o radônio), atinjam o equilíbrio secular e, portanto, não produzam alterações significativas nos cálculos das concentrações dos elementos em estudo. Contudo, esta correção foi praticamente desnecessária, visto que as concentrações de ^{232}Th e ^{238}U presente nas amostras de solo analisadas eram extremamente baixas.

Neste trabalho, foram usados quatro diferentes tipos de potes plásticos. Cada geometria dos potes foi escolhida a fim de adequar a eficiência de aquisição de dados com o

volume de amostra seca disponível. O maior pote utilizado possuía 3 cm de altura e 6 cm de diâmetro e o menor 3 cm de altura e 1 cm de diâmetro.

O processo de preparo das amostras vegetais foi semelhante ao das amostras de solo. Embora elas não necessitem ser peneirada, antes de serem submetidas aos processos de secagem e de trituração, elas foram cuidadosamente escovadas e lavadas com água e sabão. Isto permitiu a remoção de objetos estranhos à amostra vegetal, principalmente a poeira proveniente do solo onde ela foi cultivada.

2.3 Arranjo experimental

Uma vez que os radionuclídeos ^{137}Cs e ^{40}K decaem espontaneamente via emissão de partículas beta (β^- e β^+ , respectivamente), com subsequente emissão de radiação gama, a determinação das concentrações destes elementos pode ser realizada através da técnica de espectroscopia da radiação γ . Em linhas gerais, o arranjo experimental necessário para a prática é composto basicamente por um detector e uma amostra, os quais são isolados do meio ambiente ao serem envoltos por uma blindagem de chumbo, um sistema eletrônico simples (constituído de uma fonte de alimentação do detector, um pré-amplificador e um amplificador) e de um sistema de aquisição de dados (uma placa de aquisição de dados controlada por um programa específico, ambos instalados em um microcomputador). A Figura 2.7 apresenta uma ilustração do arranjo experimental utilizado no Laboratório de Radioecologia (LARA) do IF-UFF.

No LARA é possível realizar medidas da radiação γ através de dois tipos de detectores, sendo um constituído de um cristal cintilador inorgânico de iodeto de sódio ativado com tálio - NaI(Tl) acoplado a uma fotomultiplicadora e outro de um material semicondutor composto por germânio hiper-puro (HPGe). Seu sistema de aquisição de dados permite

adquirir espectros de energia com 8192 canais. A seguir será apresentada uma descrição dos principais componentes do sistema de espectroscopia γ presentes no LARA.

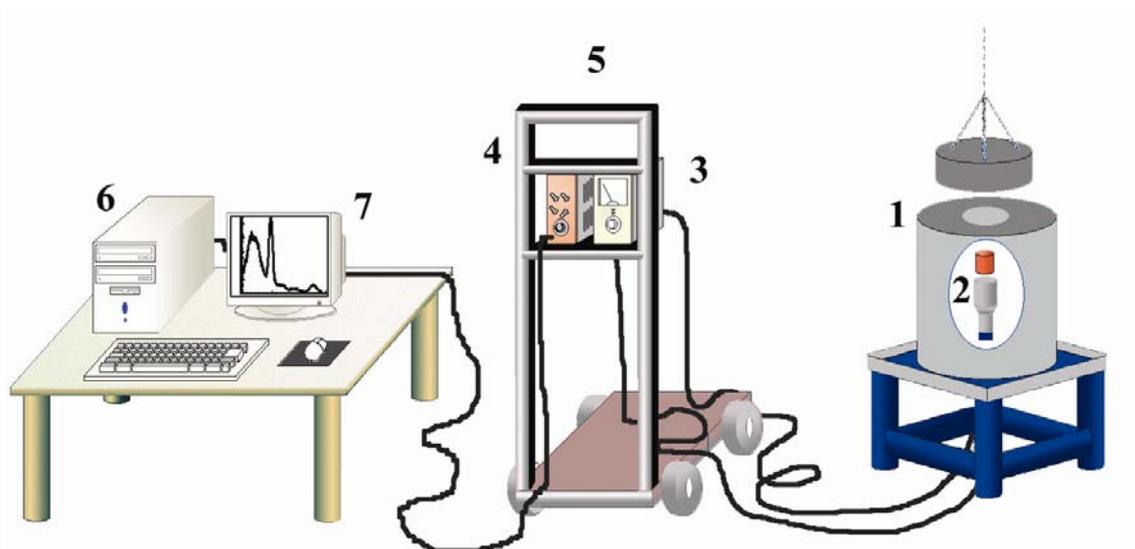


Figura 2.7: Esquema do arranjo experimental utilizado no LARA. Nele são observados a Blindagem de Chumbo (1), o Detector acoplado a um Pré-Amplificador em sua base (2), a Fonte de Alta Tensão (3), o Amplificador (4), O Rack para suporte da eletrônica (5), um Microcomputador onde estão inseridos a Placa Multicanal e o Software para aquisição de dados (6) e um Monitor para visualização do espectro de energia (7).

2.3.1 A blindagem

A função de uma blindagem é minimizar a influência de qualquer fonte de radiação externa ao sistema detector-amostra. As principais fontes de radiação de fundo podem ser destacadas como provenientes dos filhos de decaimento das séries do ^{232}Th e ^{238}U , de ^{40}K (presentes nos materiais de alvenaria que formam a estrutura do laboratório), da radiação cósmica (proveniente da interação das partículas e de ondas eletromagnéticas vindas do sol com a atmosfera da terra) e de fontes artificiais presentes no laboratório (tais como materiais de calibração ou amostras a serem analisadas).

No LARA existem duas blindagens principais de fabricação caseira. Uma na forma de um bloco retangular (como a ilustrada na Figura 2.7) e outra na forma cilíndrica. Ambas

possuem paredes compostas de chumbo com de 12 cm de espessura, além de uma camada interna de 2,5 cm de cobre. A tampa é constituída de 20 cm de altura de chumbo, com uma camada inferior de 2,5 cm de cobre. A finalidade do uso de revestimento de cobre é a de minimizar o efeito de *backscattering* (radiação de retro-espalhamento), que ocorre nas paredes da blindagem.

O efeito destas blindagens pode ser observado através de um detector de radiação de Iodeto de Sódio (NaI). Quando este permanece externo à blindagem, ele detecta cerca de 180 eventos por segundo. Em seu interior, esta taxa é reduzida para menos de 3 contagens por segundo.

2.3.2 Detector de iodeto de sódio – NaI(Tl)

Os detectores formados por um cristal Iodeto de Sódio (NaI) são cintiladores que produzem radiação eletromagnética quando excitados. São mais eficientes que os detectores a gás, como é o caso do detector Geiger-Müller, devido a sua maior densidade e, além disso, podem trazer informação sobre a energia da radiação incidente. O comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida pela excitação do cristal de NaI é da ordem de 200 nm (Raio X) sendo facilmente reabsorvido pelo cristal. Então, para facilitar o processo de cintilação desses detectores, o composto inorgânico NaI é dopado com um outro elemento. Nesse trabalho, o detector utilizado é do tipo dopado com Tálcio, sendo assim um detector de NaI(Tl), fazendo com que a radiação emitida pelo cristal seja da ordem de 400 nm, entrando na faixa do comprimento de onda da luz visível.

No LARA existem dois tipos de detectores de NaI(Tl), tendo os dois diâmetros de 7,5 cm (3" X 3"). Eles foram adquiridos da empresa EG&G ORTEC, sendo um de

modelo 905-4 e o outro 905-4W. O primeiro é um detector plano e o segundo possui um pequeno orifício (ou “poço”), o qual permite introduzir uma pequena amostra no interior de seu cristal. O funcionamento tipo de detector pode ser visto em [Ribas, 2002; Knoll, 1979; Regan, 1997]. Esse detector é composto, além do material cintilador, de uma fotomultiplicadora acoplada a esse material. Após haver a interação da radiação com o cristal, a luz emitida é enviada por meios ópticos até o fotocátodo da fotomultiplicadora, onde através de uma interação fotoelétrica, elétrons são arrancados e acelerados por uma diferença de potencial da ordem de 1000 V pelo interior da fotomultiplicadora até o dinodo. Cada elétron arranca, então, mais 2 ou 3 elétrons, que mais uma vez são acelerados até um outro dinodo, fazendo com que cada um arranque mais elétrons e assim sucessivamente. Esses elétrons no final do processo vão produzir um pulso elétrico, da ordem de centenas de milivolts, que será levado até o pré-amplificador. A altura deste pulso é proporcional à energia depositada no detector pela radiação. O ganho devido à multiplicação dos elétrons para uma fotomultiplicadora típica de 10 estágios é da ordem de 10^7 .

A Figura 2.8 mostra o esquema de funcionamento de um detector de NaI(Tl) acoplado a uma fotomultiplicadora, indicando os mecanismos básicos da interação da radiação γ com o cristal cintilador e com as paredes da blindagem. A partir desta Figura, podem ser observados processos típicos dessa interação, tais como a absorção fotoelétrica, o espalhamento Compton e a produção de pares elétron-pósitron.

O efeito fotoelétrico é um processo onde a radiação incidente interage com o átomo como um todo. Nesse processo, toda a energia da radiação incidente ($h\nu$) é transferida para o elétron (E_e) ligado de um átomo, fazendo com que esse elétron (fotoelétron) seja ejetado. A energia cinética do fotoelétron é igual à diferença entre a

energia da radiação incidente e a sua energia de ligação. Esses fotoelétrons por sua vez vão interagir com a matéria. Embora alguma energia seja absorvida pelo recuo do núcleo do átomo, essa é desprezível perante a energia da radiação incidente e a energia do elétron ejetado.

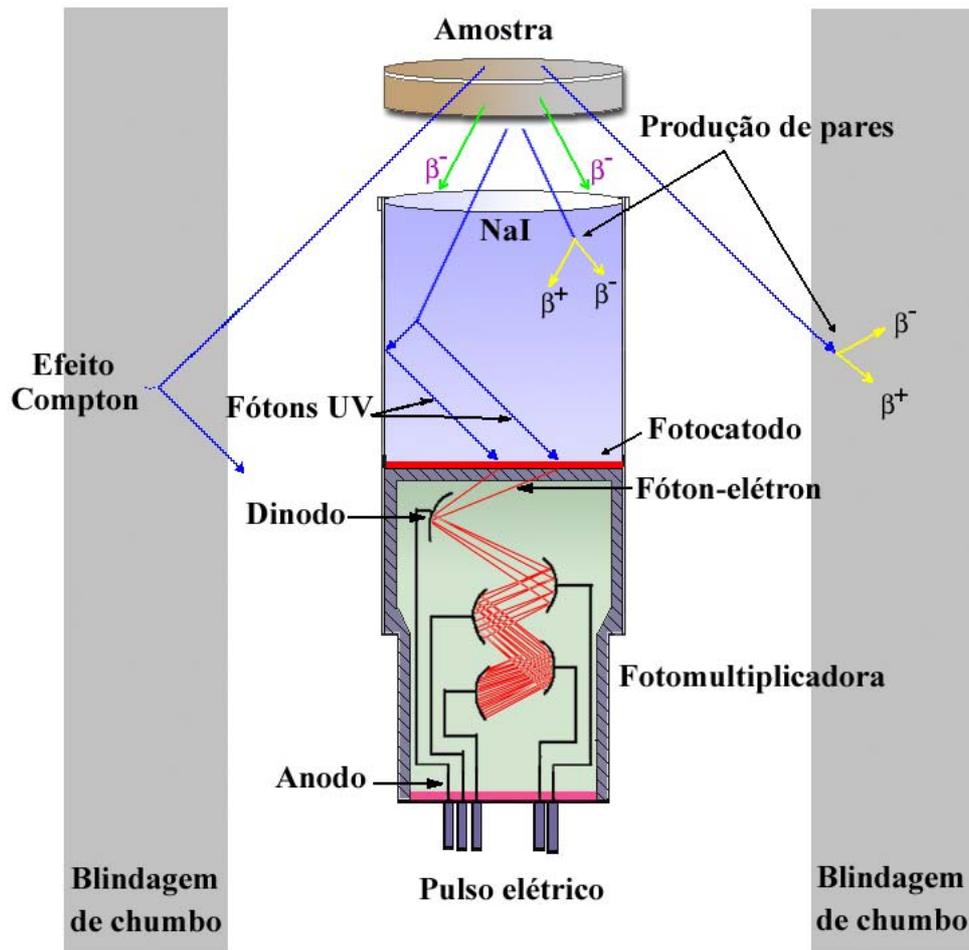


Figura 2.8: Ilustração do funcionamento de um detector cintilador do tipo NaI(Tl) e de uma fotomultiplicadora, onde são ressaltados os principais tipos de interação que ocorrem no seu interior [ORTEC, 1984].

Em consequência do rearranjo dos elétrons nos orbitais do átomo acontece a emissão de radiação X, podendo ser algumas vezes (no caso de átomos mais leves) radiação ultravioleta (UV). A probabilidade de acontecer o efeito fotoelétrico é proporcional à energia de ligação do elétron, ou seja, é mais provável acontecer esse

processo numa camada mais próxima ao núcleo (camada K, por exemplo). Uma característica importante do efeito fotoelétrico em um detector cintilador, é que fótons monoenergéticos que interagem por esse processo produzem uma distribuição monoenergética de energia para os fotoelétrons dentro do volume do detector. A Figura 2.9 ilustra esse fenômeno.

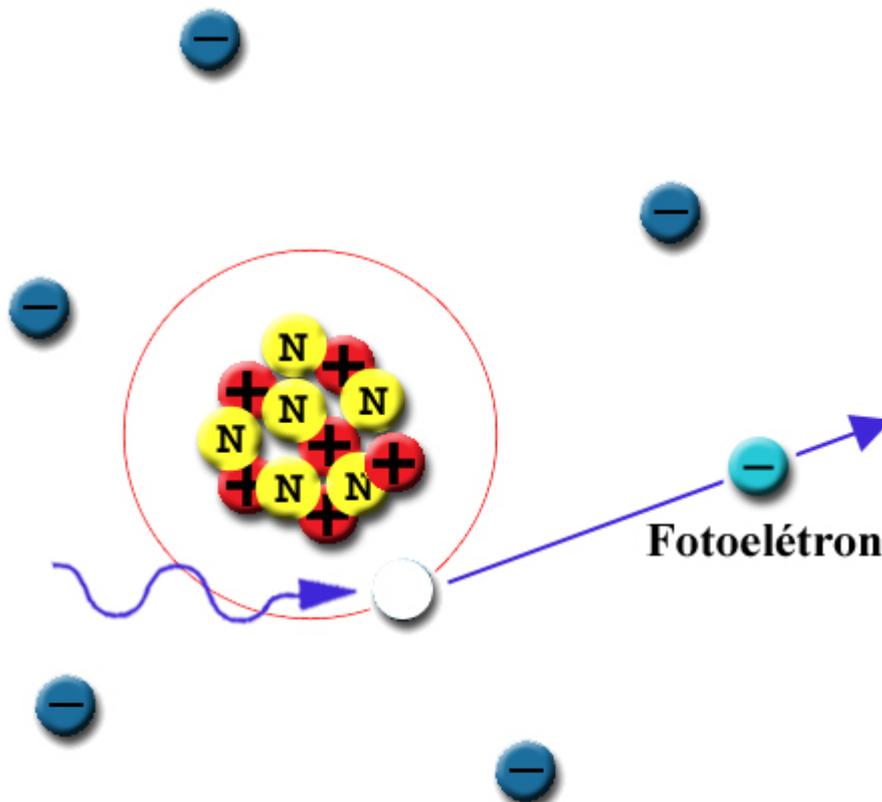


Figura 2.9: Ilustração do processo de interação da radiação com a matéria por meio da absorção fotoelétrica que acontece no cristal do detector de NaI(Tl) e no fotocátodo da fotomultiplicadora.

No efeito Compton a radiação incidente é espalhada pelo elétron, sendo que agora, com transferência parcial de energia. Esse processo de espalhamento geralmente ocorre com elétrons considerados livres ou fracamente ligados (camadas superiores da eletrosfera), porque a probabilidade de acontecer esse fenômeno é inversamente proporcional à energia de ligação do elétron, sendo ainda, proporcional ao número

atômico do átomo. Considerando que a energia e a quantidade de movimento têm que ser conservadas durante o espalhamento, a energia cinética do elétron é dada pela diferença entre a energia da radiação incidente ($h\nu_1$) e a radiação ($h\nu_2$) espalhada. Conforme ilustrado na Figura 2.10, após a interação, essa radiação é espalhada por um ângulo (φ) em relação a trajetória de incidência e o elétron escapa com um ângulo (θ) dessa mesma direção. Quando θ for igual a zero acontece o que é chamado de espalhamento rasante (*Compton Edge*). Nesse caso, a energia da radiação incidente não muda e o elétron quase não tem energia para ser espalhado. O outro caso extremo é quando ângulo θ é igual a 180° . Nesse caso a radiação incidente é retro-espalhada (*Backscattering*) e o elétron recua no sentido da radiação incidente. A probabilidade de acontecer o efeito Compton é inversamente proporcional à energia de ligação do núcleo.

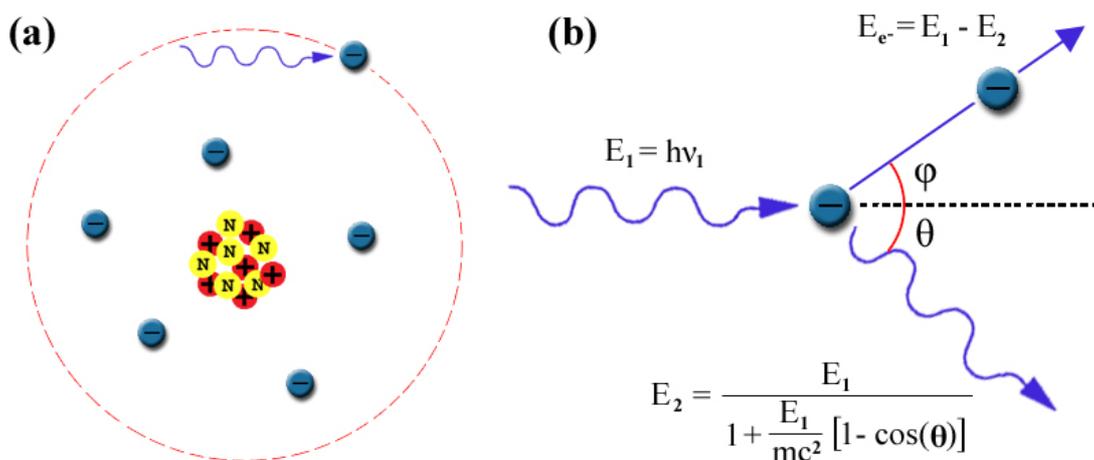


Figura 2.10: (a) Ilustração do processo de interação da radiação com a matéria por meio do espalhamento Compton que acontece no cristal do detector de NaI(Tl). (b) Esquema ampliado da interação entre a radiação e o elétron, onde podem ser observadas as energias da radiação antes (E_1) e após a interação (E_2), além da energia do elétron espalhado (E_{e^-}).

Como as possibilidades de espalhamento para o elétron variam em função do ângulo de espalhamento θ , o espectro de energia que representa esse fenômeno será contínuo com valor máximo referente ao ângulo 180° e mínimo referente ao ângulo 0° .

Outro fenômeno referente à interação da radiação com a matéria é a produção de pares elétron-pósitron. Trata-se da interação da radiação incidente com o campo eletromagnético do átomo. Nessa interação não há o espalhamento de nenhum elétron da eletrosfera. Acontece que se a energia da radiação incidente for superior a 1022 keV, dobro da energia de repouso do elétron ($2m_e c^2$), essa radiação deixa de existir formando um par elétron-pósitron. A energia total do par de partículas será igual à energia da radiação incidente e sua energia cinética será igual à energia total menos a energia necessária para a formação dessas duas partículas ($2m_e c^2$). A probabilidade para a

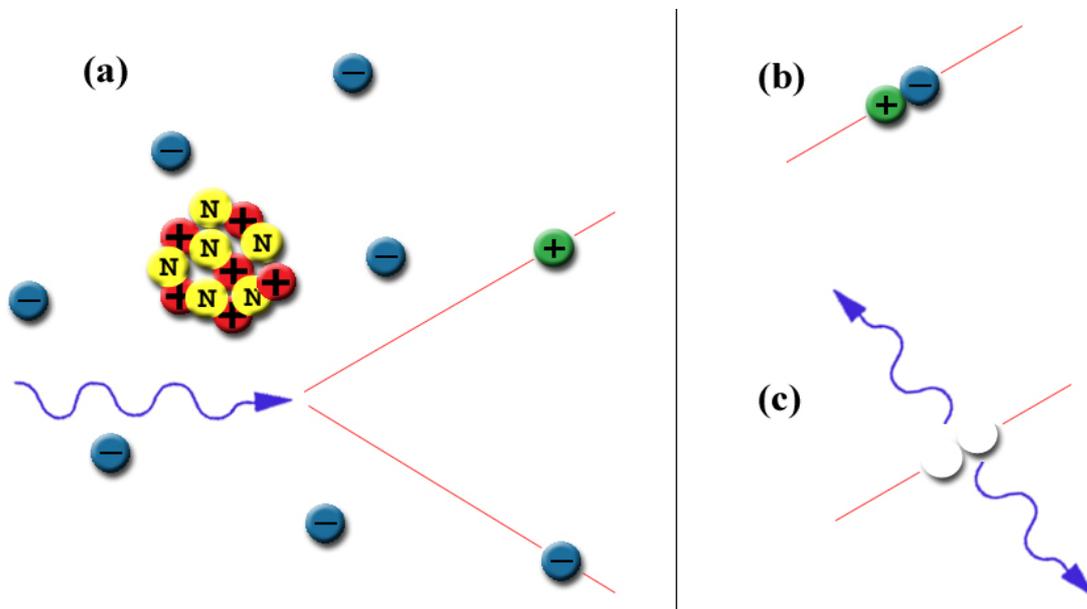


Figura 2.11: Ilustração do processo de interação da radiação com o cristal do detector de NaI(Tl) por meio de (a) produção de pares elétron-pósitron e (b) aniquilação formando (c) dois fótons de 511 keV.

Ao se observar um espectro de energia devido a interação da radiação gama de uma fonte de ^{22}Na com um detector de NaI(Tl) (Figura 2.12), é possível identificar esses três processos de interação da radiação com a matéria: um fotopico de 1275 keV (referente à absorção fotoelétrica da radiação γ proveniente da fonte), o efeito Compton desde seu espalhamento rasante até o retro-espalhamento e o fotopico de 511 keV. Entretanto,

nem sempre os eventos computados para essa energia de 511 keV referem-se ao processo de produção de pares elétron-pósitron. A sua formação também acontece quando o decaimento de um núcleo radioativo se dá por uma partícula β^+ (que é o caso do ^{22}Na), que nada mais é que um pósitron. Esse pósitron pode interagir com um elétron (muitas vezes da própria fonte) formando um par de fótons de 511 keV, que será detectado por efeito fotoelétrico.

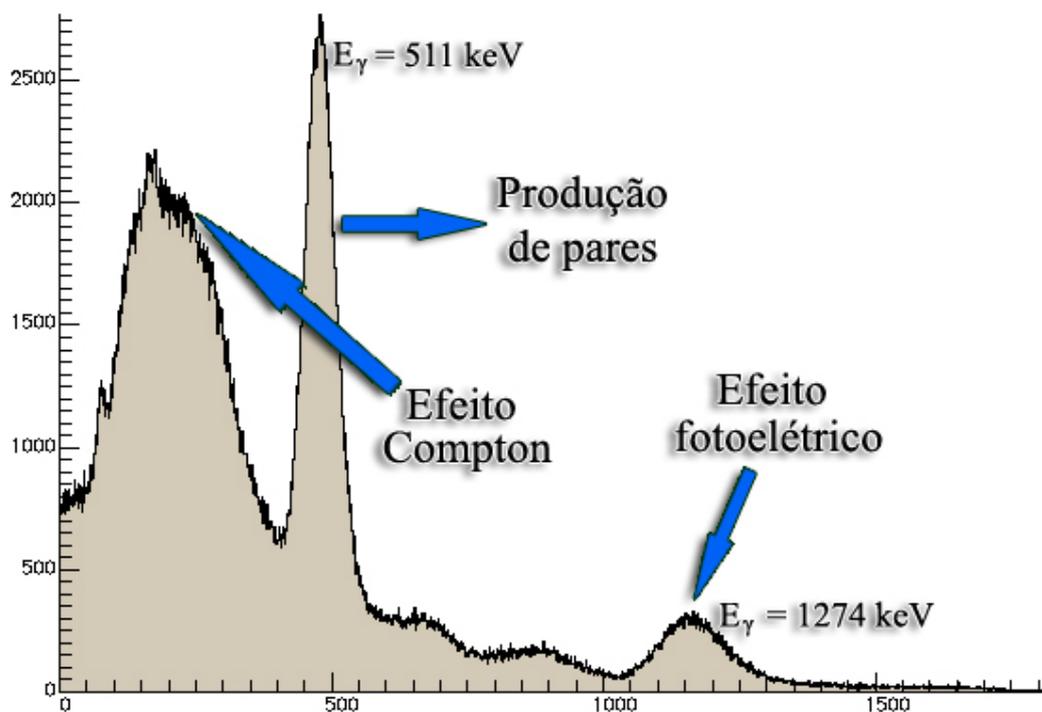


Figura 2.12: Espectro de energia adquirido utilizando um detector de NaI(Tl), típico para as amostras vegetais analisadas nesse trabalho, onde podem ser observados os três processos de interação com a radiação com a matéria.

2.3.3 Detector de germânio hiper-puro (HPGe)

O detector de HPGe (*High-Purity Germanium*) utilizado foi o modelo GMX 10180-P da EG&G ORTEC, acoplado a um criostato com configuração "Pop-Top". Este modelo, por ser portátil, está acoplado a um Dewar de 3 litros (reservatório de

nitrogênio líquido, Modelo CFG-PG da EG&G ORTEC). Esse detector para ser utilizado necessita estar a temperatura de nitrogênio líquido (77 K). As duas principais diferenças entre o detector de HPGe e o de NaI(Tl) está na eficiência de detecção e na resolução em energia. Esses dois tópicos serão discutidos na seção 2.4.

Para entendermos o funcionamento de um detector de HPGe é necessário antes conhecermos as propriedades de um semicondutor. Semicondutores são sólidos cristalinos de condutividade elétrica intermediária entre condutores e isolantes. De uma maneira geral, semicondutores são sólidos nos quais à temperatura de 0 K seus elétrons de valência preenchem toda banda de valência e a banda de condução (banda de energia onde os elétrons possuem alta mobilidade) está completamente vazia. Portanto, a condutividade dos semicondutores à temperatura ambiente é causada pela excitação de uns poucos elétrons da banda de valência para a banda de condução. A energia mínima para que um elétron atravesse para a banda de condução é chamada de *gap*, que para semicondutores é de alguns eV. Quando um elétron faz essa passagem, ele deixa um buraco na banda de valência. Uma descoberta interessante na Física da Matéria Condensada é que o espaço deixado pelo elétron funciona como se fosse um “pósitron”, que na aplicação de um campo elétrico se desloca no sentido oposto ao elétron, formando, assim, a corrente efetiva do semicondutor.

O semimetal Ge ($Z=32$) forma estruturas cristalinas, que podem ser representadas por uma rede de Bravais na forma cúbica da face centrada FCC (*face centered cubical*) com dois átomos na base. Ele possui 4 elétrons na banda de valência, que formam ligações covalentes com átomos vizinhos. Basicamente, o detector funciona como descrito acima, onde a excitação do elétron para a passagem da banda de valência para a banda de condução se dá pela interação corrigir o tamada radiação com o cristal.

Isso acontecerá quando a energia dessa radiação for maior que o *gap* de energia entre essas duas bandas, que para o cristal de Ge é da ordem de 3 eV. A probabilidade de haver essa transição pode ser descrita pela função de Boltzmann:

$$P(T) = CT^{\frac{2}{3}} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (2.1)$$

onde:

E_g = Energia do *gap*;

k = Constante de Boltzmann;

T = Temperatura absoluta;

C = Constante que depende do material.

Como a energia do *gap* dos semicondutores é pequena, ocorrem excitações térmicas no cristal. Essas excitações provocam ruídos na eletrônica que podem comprometer a aquisição dos dados. Por isso, os semicondutores têm que trabalhar a temperaturas bem baixas, de tal forma que o cristal do germânio é resfriado a temperatura de nitrogênio líquido. A Figura 2.13 mostra um esquema da estrutura do detector de HPGe.

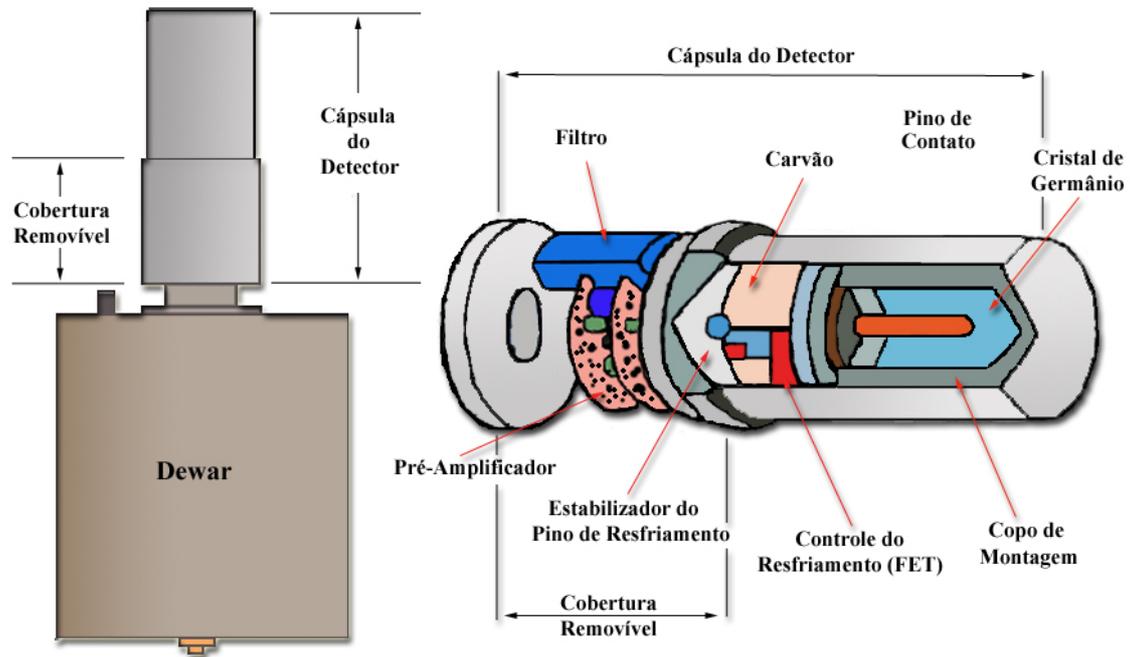


Figura 2.13: Ilustração do detector de Germânio Hiper-Puro, utilizado nesse trabalho. À esquerda, podemos ver sua estrutura externa com a Cápsula do Detector e o Dewar. À direita, são exibidos os componentes internos mais importantes da Cápsula do Detector.

Para que o resfriamento do detector de HPGe seja feito, uma peça chamada de criostato faz a conexão entre o reservatório de nitrogênio e o cristal. Além disso, para o funcionamento do detector é necessário que toda a cápsula do detector esteja em vácuo.

2.3.4 Propriedades gerais dos detectores

Os detectores possuem propriedades específicas, que são levadas em conta no momento da escolha do sistema de detecção, a fim de proporcionarem melhores resultados durante o processo de análise das amostras. A seguir serão descritas as principais propriedades dos detectores de radiação γ .

2.3.4.1 Resolução em energia

Uma vez que existe uma proporcionalidade entre a energia do pulso produzido na saída da fotomultiplicadora e a energia da radiação incidente depositada no detector, essa radiação deveria sempre formar pulsos iguais, sendo possível identificar sua energia com uma precisão infinita. Entretanto, podem ocorrer dois fatores que impeçam esse acontecimento: a flutuação estatística no número de fótons produzidos pelo detector cintilador ou do número de portadores de carga no detector semicondutor, bem como a influência do ruído dos componentes eletrônicos do sistema de aquisição (detector, pré-amplificador, amplificador, cabos, etc.). Como consequência disso, a radiação gama que incide num detector produz um fotopico no espectro de energia na forma de uma distribuição gaussiana, onde o centróide dessa distribuição é o valor mais provável da energia dessa radiação incidente.

Ao analisar espectros que apresentem dois ou mais fotopicos de energias próximas, pode-se notar que quando maior for a largura dessa distribuição, maior será a probabilidade de ocorrer uma sobreposição, fazendo com que a identificação individual de cada pico torne-se prejudicada.

De uma maneira formal, a definição de resolução em energia pode ser expressa pela a razão entre a largura de um fotopico na metade de sua altura (FWHM - *Full Width at Half Maximum*) e a sua posição de seu centróide:

$$R = \frac{\Delta E}{E} \times 100 \quad (2.2)$$

Os valores médios de FWHM obtidos para os fotopicos de 662 keV (referente ao ^{137}Cs) e 1461 keV (referente ao ^{40}K) nas amostras vegetais, utilizando o detector de NaI(Tl) plano foram de 56 keV e 88 keV, respectivamente, resultando em resoluções de energia de 8,5% e 6%, respectivamente.

Quando utilizado o detector de HPGe para adquirir espectros de energia para esses mesmos dois radionuclídeos (^{137}Cs e ^{40}K) os valores de resolução em energia ficaram em 0,23% (FWHM = 1,5 keV) e 0,17% (FWHM = 2,5 keV), respectivamente.

Esta grande diferença na resolução em energia entre detectores NaI(Tl) e HPGe é nítida ao compararmos seus espectros de energia provenientes de uma mesma amostra, conforme apresentado na Figura 2.14. Isso acontece devido ao fato de existir uma grande flutuação estatística referente ao número de fótoeletrons (que são produzidos na fotomultiplicadora) do detector de NaI(Tl). Entretanto, este efeito não acontece no detector de HPGe, onde a altura do pulso elétrico é produzido é devido ao número de portadores de carga, que são formados diretamente no semicondutor. Por esses motivos, o detector de HPGe possui uma resolução em energia muito superior ao cristal de NaI(Tl), fazendo com que os fotopicos no espectro de energia tenha uma largura bem menor para esse detector.

Com isso o detector de HPGe seria o mais indicado para a análise de espectros de energia, principalmente para espectros complexos onde os fotopicos tivessem energias muito próximas. Entretanto, essa vantagem tem seu preço. A tecnologia para a construção de detectores semicondutores, associado à necessidade de resfriamento por nitrogênio líquido faz com que a utilização desse detector seja muito mais cara que a de um NaI(Tl). Para se ter uma idéia, enquanto um detector NaI custa, em média, US\$ 1.000, o preço de um detector de HPGe com 10% de eficiência de detecção em relação a este mesmo NaI é de US\$ 25.000.

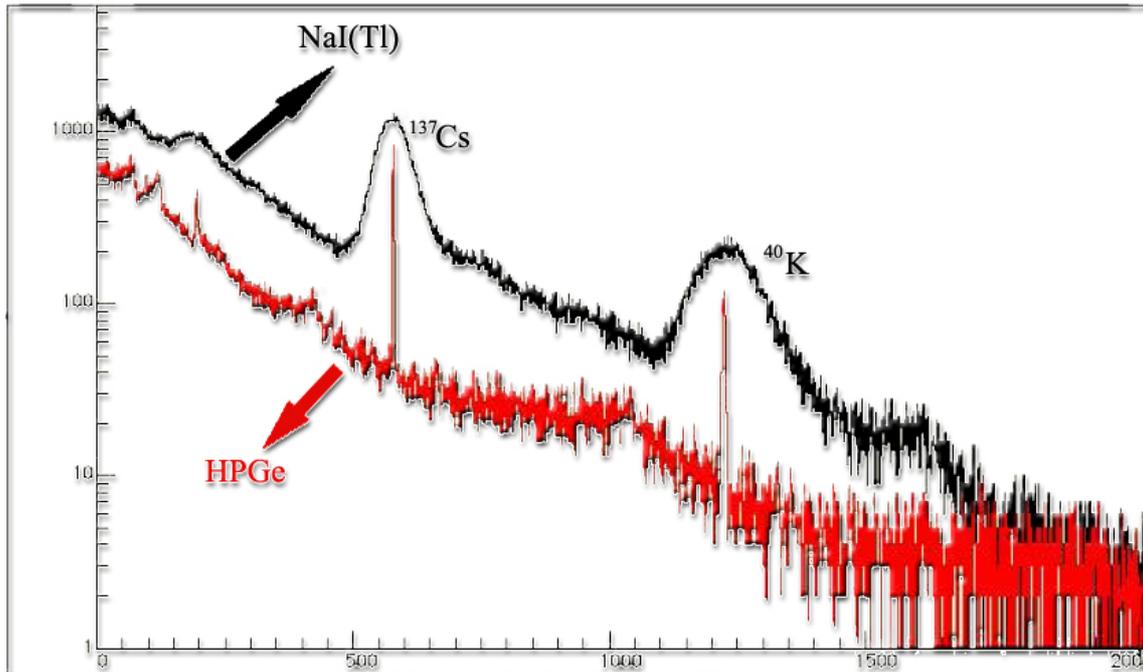


Figura 2.14: Espectros de energia típicos para as amostras vegetais contaminadas analisadas pelos detectores HPGe e NaI(Tl) do LARA.

Nesse trabalho, a maior parte das análises das amostras tanto de solo quanto vegetais foram realizadas utilizando-se o detector de NaI(Tl), um vez que os fotopicos referentes à emissão gama de ^{137}Cs e ^{40}K possuem uma diferença de energia muito superior aos valores correspondentes à resolução em energia para este tipo de detector. O que poderia atrapalhar a análise desses espectros seriam os picos referentes à emissão gama dos elementos filhos da série de decaimento do ^{232}Th e ^{238}U , cujos valores em energia são próximos aos picos estudados. Por exemplo, as emissões gama de $^{208}\text{Tl} + ^{214}\text{Bi}$ em 596 keV, de ^{214}Bi em 609.3 keV, 1120.3 keV, 1459 keV e 1764.5 keV. Entretanto, análises prévias utilizando o detector de HPGe mostraram que a concentração de elementos naturais nas amostras vegetais eram desprezíveis, reforçando, assim, a utilização do detector de NaI(Tl).

2.3.4.2 Eficiência de detecção

Se cada *quantum* que fosse emitido pela amostra ou cada *quantum* que interagisse com o cristal do detector fosse detectado, nós diríamos que esse detector possuiria 100% de eficiência de detecção. Contudo, para a radiação gama, em que a detecção se dá de maneira indireta, alguns fatores podem impedir que todos os eventos sejam observados, implicando numa eficiência de detecção inferior a 100 %.

A eficiência de detecção é uma grandeza que pode ser dividida em dois tipos [Knoll, 1979]:

Eficiência Absoluta (E_{abs}), que relaciona o número de pulsos registrados pelo detector, com o número de fótons ou partículas emitidas pela fonte e;

Eficiência Intrínseca (E_{int}), que relaciona o número de pulsos registrados com o número de fótons ou partículas que incidem no detector.

Suas expressões são definidas, respectivamente, por:

$$\varepsilon_{abs} = \frac{N^{\circ} \text{ de Pulsos registrados}}{N^{\circ} \text{ de quanta de radiação emitidos pela fonte}} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{int} = \frac{N^{\circ} \text{ de Pulsos registrados}}{N^{\circ} \text{ de quanta de radiação incidentes no detector}} \quad (2.4)$$

Esses dois tipos de eficiência relacionam-se, para fontes isotrópicas, da seguinte forma:

$$\varepsilon_{int} = \varepsilon_{abs} \frac{4\pi}{\Omega} \quad (2.5)$$

Onde Ω é o ângulo sólido de detecção.

A eficiência intrínseca de um detector depende essencialmente da energia da radiação, do tipo e da espessura física do material detector na direção da radiação incidente. Em geral, as eficiências de contagens podem ser separadas pela natureza do

evento registrado. Se todas as interações forem assumidas como contadas, não importando os valores das energias, é apropriado utilizar o cálculo de eficiências totais. Por exemplo, na Figura 2.12, teríamos que levar em conta todos os eventos registrados no espectro de energia. Se considerarmos somente a área do fotopico referente a energia do radionuclídeo, não estaremos computando os eventos em que não são depositadas toda a energia da radiação incidente, como é o caso do espalhamento Compton.

Para efeito de comparação, foram calculadas as eficiências relativas levando-se em conta somente à área abaixo do fotopico de interesse, considerando, então, somente as interações que depositam toda a energia (efeito fotoelétrico) para os três tipos de detectores disponíveis no LARA. Assim, dividindo-se o número de eventos na janela de energia do fotopico de interesse, adquiridos em um detector, pelo número de eventos nessa mesma janela, para outro detector, obtém-se a eficiência relativa entre esses dois detectores. Utilizando o detector de NaI(Tl) plano como referência e normalizando o número de eventos pelo tempo de aquisição, a expressão que descreve a eficiência relativa para os outros dois detectores é dada por:

$$Eficiência\ relativa = \left[\frac{N_i}{t_i(s)} \times \frac{t_c(s)}{N_c} \right] \times 100 \quad (2.6)$$

onde

N_i = Número de eventos contados para o detector de NaI(Tl) com orifício central ou o detector de HPGe;

t_i = Tempo de aquisição do espectro para um desses dois detectores;

N_c = Número de eventos contados para o detector de NaI(Tl) convencional;

t_c = Tempo de aquisição do espectro para esse detector;

Analisando a eficiência relativa do fotopico de energia 662 keV referente ao radionuclídeo ^{137}Cs , o valor encontrado para o detector de “poço” foi de aproximadamente 300 % de eficiência relativa. Esse resultado indica que para uma análise utilizando este tipo de detector é possível reduzir o tempo de aquisição em um fator 3.. Entretanto, este tipo de detector permite a análise de amostras vegetais com massa de 2 a 6 g. No caso em que as amostras possuem baixas concentrações dos radionuclídeos analisados, este valor de massa pode não ser suficiente para produzir fotopicos acima do nível de *background*. Este efeito ainda tende a piorar para emissões gama de altos valores de energia, como é o caso do ^{40}K (1462 keV), uma vez que a eficiência de detecção diminui à medida que aumenta o valor a energia da radiação eletromagnética.

Para o detector de HPGe o valor encontrado para eficiência relativa foi de 11%. Os detectores de HPGe são vendidos com especificações técnicas de eficiência relativa ao detector de NaI(Tl). No caso do HPGe adquirido pelo LARA seu valor segundo o fabricante é de 10%, estando de acordo com o valor experimental obtido neste trabalho. Para este trabalho, a segunda vantagem de se usar detectores NaI(Tl) foi a de permitir uma redução significativa do tempo de aquisição das amostras, uma vez que se as amostras fossem analisadas com o detector HPGe, elas teriam que ser adquiridas em um tempo N vezes maior para atingir a mesma taxa de contagem do detector NaI(Tl) convencional. Já a escolha entre o NaI(Tl) plano e o de “poço” foi a concentração de ^{137}Cs e ^{40}K presentes na amostras. Amostras que altas concentrações destes elementos foram analisadas no detector de “poço”, enquanto que amostras com baixos valores de concentrações foram analisadas no detector plano, usando um maior tamanho dos potes de plástico.

2.4 Sistema de aquisição de dados e cálculo das concentrações

2.4.1 Calibração em energia

Para que seja possível identificar quais são os radionuclídeos presentes em uma dada amostra, é necessário que se faça inicialmente uma calibração dos espectros de energia oriundos do arranjo experimental. Os espectros de energia consistem de histogramas do número de eventos versus a intensidade do sinal elétrico (ou altura pulso) proveniente do detector. Uma vez que a altura do pulso em elétrons-volts gerado pelo detector é proporcional à energia da radiação gama incidente, busca-se encontrar qual é essa constante de proporcionalidade.

Esse procedimento pode ser realizado utilizando-se fontes radioativas com emissões gama com energias bem conhecidas. Essas fontes geram picos (devido à absorção fotoelétrica) num espectro de energia, com seus centróides em torno de posições específicas. Quanto maior a energia do gama emitido, maior será sua posição em canais do um pico formado neste histograma. Assim, é possível relacionar a energia da radiação gama incidente (em keV) com a posição (em canais) do fotopico gerado. A Figura 2.15 apresenta um exemplo da calibração em energia para o arranjo experimental, no qual foi utilizado um detector do tipo NaI(Tl) e fontes de ^{22}Na ($E_{-e} = 511 \text{ keV}$ e $E_{\gamma} = 1275 \text{ keV}$), ^{137}Cs ($E_{\gamma} = 662 \text{ keV}$), ^{60}Co ($E_{\gamma} = 1173 \text{ keV}$ e $E_{\gamma} = 1333 \text{ keV}$) e ^{133}Ba ($E_{\gamma} = 810 \text{ keV}$, $E_{\gamma} = 303 \text{ keV}$ e $E_{\gamma} = 356 \text{ keV}$). Nota-se que a distribuição dos centróides dos picos em função das respectivas energias de emissões gama pode ser

correlacionada através de um polinômio de primeiro grau. Assim, este procedimento de calibração é geralmente chamado de construção de uma reta de calibração.

É importante mencionar que a calibração em energia deve ser feita regularmente, uma vez que a posição do canal do fotopico produzido pela radiação gama incidente um detector do tipo NaI(Tl) é susceptível às flutuações na fonte de alimentação do detector (devido à variações na tensão da rede elétrica), bem como variações na temperatura ambiente. Para que este efeito seja minimizado, recomenda-se que o uso de estabilizadores de tensão de rede e que o arranjo experimental seja mantido numa temperatura em torno de 20° C.

A partir da construção de retas de calibração foi possível identificar e determinar que a presença dos filhos da série de decaimento dos radionuclídeos ^{232}Th e ^{238}U em amostras de solo e vegetais poderia ser desprezada. Desta forma, além de confirmar a viabilidade do uso de detectores do tipo NaI(Tl) em detrimento do detector de HPGe para a análise de amostras vegetais que compunham este trabalho, também ficou claro que para a determinação das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K usando-se detectores do tipo NaI(Tl) não foi necessário o uso de métodos matemáticos que levem em conta a interferência ou sobreposição de picos gama provenientes fontes naturais nos fotopicos de ^{137}Cs e ^{40}K , tal como o método da matriz de sensibilidade, proposto por Rybach e aperfeiçoado por Chiozzi e colaboradores [Chiozzi *et al.*, 2000, Anjos *et al.*, 2004, Anjos *et al.*, 2005]. Este último resultado permitiu uma simplificação no cálculo das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K , que será descrito a seguir.

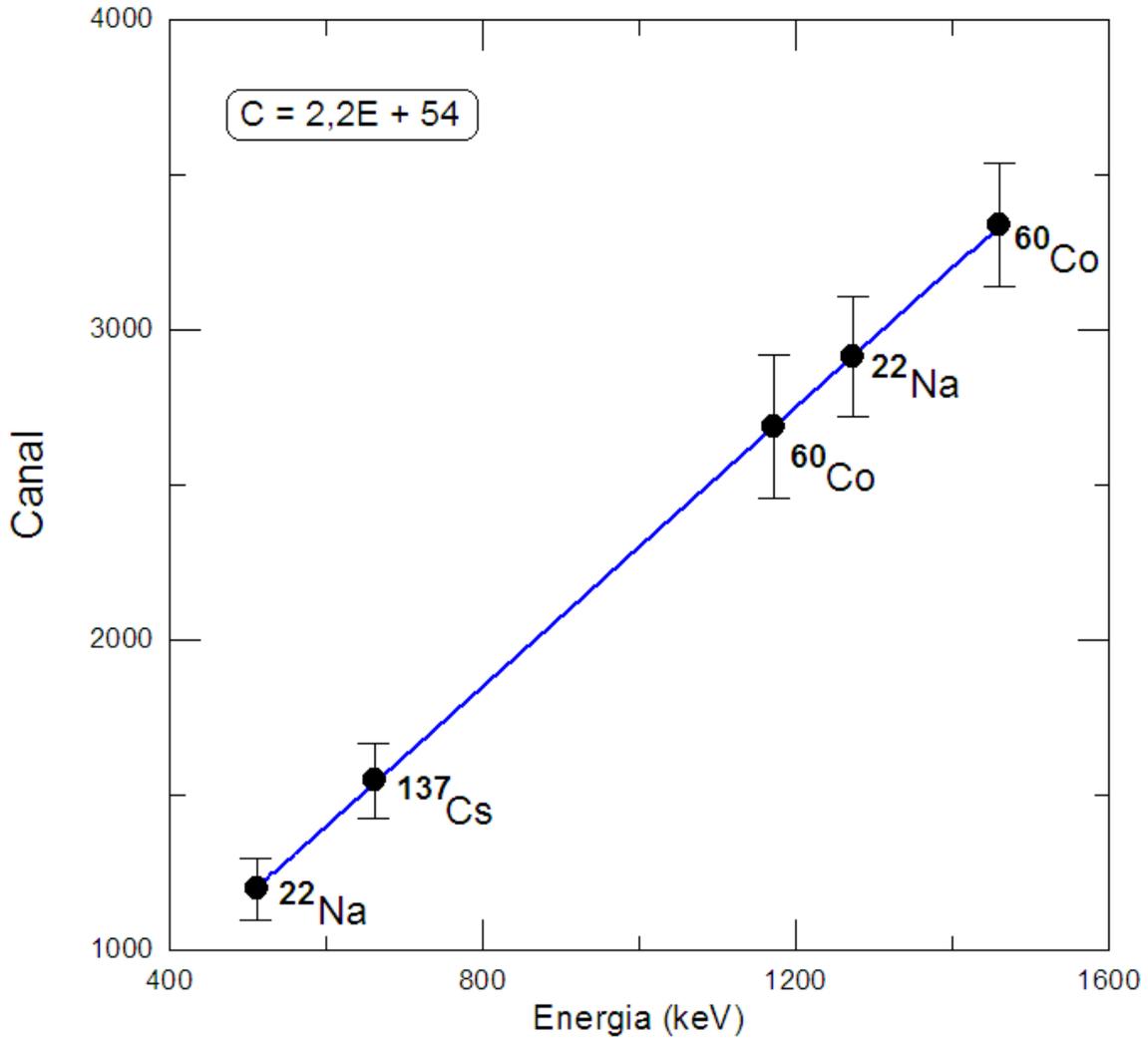


Figura 2.15: Reta de calibração em energia para o arranjo experimental composto de detector do tipo NaI(Tl). A Equação $C = 2,2E + 54$ representa o número de canais C em função da energia E em keV.

2.4.2 Cálculo das concentrações e estimativas de suas incertezas

Para que seja possível calcular a concentração de um determinado radionuclídeo de uma amostra desconhecida é necessário levar em consideração algumas informações contidas no espectro de energia e também as características intrínsecas do detector. Para isso, a Equação que descreve esse cálculo é dada por [ORTEC, 1984]:

$$\text{Atividade da Amostra Desconhecida} = \left(\frac{\sum C_D - \sum C_f}{t} \right) \frac{1}{G \varepsilon_p f} \quad (2.7)$$

onde $\sum C_D$ representa a soma das contagens sob a região delimitada pelo fotopico da amostra desconhecida; $\sum C_f$ é a soma das contagens no espectro de fundo, na mesma região delimitada pelo do fotopico; t representa o tempo de aquisição em segundos; ε_p a eficiência intrínseca do fotopico para o detector utilizado na energia da radiação incidente; G é a área do detector $(\text{cm}^2)/4\pi s^2$, onde s é a distância da fonte ao detector em cm e; f representa a fração de decaimento ou *branching ratio*. Os valores de f para ^{137}Cs é 0,85 para $E_\gamma = 662 \text{ keV}$ e, 0,11 para ^{40}K com $E_\gamma = 1461 \text{ keV}$ [Lederer & Shirley, 1978; RHH, 1970].

Esse método de cálculo de concentração é denominado método absoluto. Entretanto, uma Equação semelhante a 2.7 pode ser escrita para o cálculo de uma amostra onde seja conhecida sua atividade, ou seja, uma amostra padrão. Dividindo-se uma Equação pela outra, é possível eliminar os termos que levem em conta as características intrínsecas do detector, obtendo-se assim:

$$\frac{\text{Atividade da Amostra Desconhecida}}{\text{Atividade da Amostra Padrão}} = \frac{\sum C_D - \sum C_F}{\sum C_P - \sum C_F} \quad (2.8)$$

onde $\sum C_D$ representa a soma das contagens sob a região delimitada pelo fotopico da amostra desconhecida; $\sum C_P$ a soma das contagens sob a região delimitada pelo fotopico da amostra Padrão e; $\sum C_F$ a soma das contagens no espectro de fundo, na mesma região delimitada pelo do fotopico;

Esse método para o cálculo da concentração da amostra desconhecida é denominado método relativo e são necessárias algumas exigências para sua utilização. A primeira é que a amostra padrão e a amostra desconhecida devem seguir a mesma constituição ou densidades semelhantes, bem como possuírem a mesma geometria

volumétrica. Essas amostras devem conter o mesmo radionuclídeo, ou seja, o fotopico gerado pelo espectro de aquisição da amostra padrão deve ter a mesma energia da amostra desconhecida e o valor da integração da região desse fotopico deve ser normalizado pelo tempo de aquisição. Além disso, a aquisição da amostra padrão e da amostra desconhecida, assim como a aquisição do número de eventos da amostra de fundo, deve ser realizada no mesmo arranjo experimental.

Para a confecção das amostras padrão é necessário que o material utilizado tenha sua atividade muito bem definida com o mínimo de incerteza possível, para que o valor encontrado para a atividade da amostra desconhecida seja confiável. Por isso, a amostra padrão utilizada para o cálculo das concentrações de ^{137}Cs nas amostras de solo foi confeccionada misturando-se uma amostra de sílica PA, com uma solução líquida de ^{137}Cs , que possuía concentração de $(574 \pm 5) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ em outubro de 2004. A solução líquida padrão de ^{137}Cs foi fornecida pela CNEN e a sua preparação foi realizada no LARA. Já para o cálculo das concentrações nas amostras vegetais uma amostra de serragem foi misturada a essa mesma solução líquida de ^{137}Cs . O padrão de potássio foi confeccionado utilizando-se o material de referência RGK-1 obtido na Agência Internacional de Energia Nuclear (IAEA). Esse material é uma amostra de sulfato de potássio (K_2SO_4) com concentração de $(44,8 \pm 0,3) \%$ de potássio, que equivale a $(14022 \pm 94) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ de ^{40}K .

Após o cálculo da atividade de ^{137}Cs e ^{40}K em cada amostra, utilizando-se a Equação 2.8, os valores resultantes foram divididos pela massa seca da amostra e, assim, foi possível obter as respectivas concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K em unidades de $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Para a estimativa das incertezas dos valores de concentrações das amostras analisadas, todos os parâmetros que contribuíram para esse erro foram levados em consideração, tais como o número de eventos, a massa da amostra, as incertezas das concentrações dos padrões etc. Assim, efetuando-se a propagação de erros destes parâmetros obteve-se a seguinte expressão:

$$Erro(\%) = \left[\left(\frac{\sqrt{C_D}}{C_D - C_F} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{C_P}}{C_P - C_F} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{C_F}}{C_P - C_F} - \frac{\sqrt{C_F}}{C_D - C_F} \right)^2 + \left(\frac{0,05}{M_D} \right)^2 + \left(\frac{0,05}{M_P} \right)^2 + (I_P)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times 100 \quad (2.9)$$

Onde C_D representa o número de contagens sob a região delimitada pelo fotopico da amostra desconhecida; C_P o número de contagens sob a região delimitada pelo fotopico da amostra Padrão; C_F o número de contagens sob a região delimitada pelo fotopico da amostra de fundo; M_D a massa da amostra desconhecida; M_P a massa da amostra padrão e; I_P a incerteza relativa da atividade da amostra padrão.

Uma vez que a integração da região correspondente à radiação gama incidente é referente a uma distribuição de Poisson, o desvio padrão dessa área é dado pela raiz quadrada do número de eventos, por isso o uso desse operador na Equação 2.9.

2.4.3 Limite inferior de detecção (LID)

O termo limite inferior de detecção pode ser definido como a menor atividade da amostra analisada que pode ser detectada, sob condições experimentais estabelecidas. Neste caso, o limite de detecção é dado pela menor concentração de um determinado radionuclídeo em que se possa confiar que essa atividade realmente exista.

O procedimento utilizado para o cálculo do limite de detecção realizado nesse trabalho é conhecido como Limite Inferior de Detecção LID (*low limit of detection*).

Esse procedimento permite que as distribuições de Poisson, que são formadas no espectro de energia, sejam aproximadas por distribuições Gaussianas. Assim, através do cálculo do seu desvio padrão (σ_0) pode-se estimar o quanto uma medida de radiação de fundo (*background*) aproxima-se de um valor real de atividade. Para que esse procedimento seja realizado, é necessário que o número de contagens seja suficiente para que a distribuição de Poisson aproxime-se de uma gaussiana. Sendo assim, o limite de detecção pode ser escrito como aproximadamente:

$$LID = (k_\alpha + k_\beta) \sigma_0 \quad (2.10)$$

onde k_α é o valor para o percentual superior de uma variável padronizada, que corresponde ao risco de concluir de maneira errada que existe atividade na amostra (α); k_β é o valor correspondente ao grau de confiança para detectar a presença de atividade na amostra ($1 - \beta$) e; σ_0 é o desvio padrão estimado para a atividade líquida da amostra.

Uma melhor aproximação deve ser feita se os valores de α e β forem da mesma ordem de grandeza, ou seja $k_\alpha \approx k_\beta$. Quando o valor da atividade da amostra começa a deixar de ser confiável, significa que o número de contagens no espectro de energia dessa amostra está se aproximando do número de contagens da amostra de fundo. De acordo com a Figura 2.15, pode-se observar que as distribuições gaussianas referentes a essas duas amostras sobrepõem-se, fazendo com que seus desvios se aproximem um do outro ($\sigma_{\text{gross}} = \sigma_{\text{background}}$), assim:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{\text{gross}}^2 + \sigma_{\text{background}}^2} = \sigma_b \sqrt{2} \quad (2.11)$$

E o LID fica:

$$LID = (2k) (\sigma_b \sqrt{2}) \quad (2.12)$$

Se ainda levarmos em conta as características físicas do detector, a Equação 2.12 fica na forma:

$$LID = \frac{(2k)(\sigma_b \sqrt{2})}{G \varepsilon_p f} \quad (2.13)$$

onde k representa a constante resultante da aproximação ($k_\alpha \approx k_\beta$); σ_b é a raiz quadrada do número de contagens no background medido em intervalo de tempo igual ao da amostra; ε_p é a eficiência intrínseca do fotopico para o detector utilizado na energia da radiação incidente; G representa a área do detector $(\text{cm}^2)/4\pi s^2$, onde s é a distância da fonte ao detector em cm e; f é a fração de decaimento [Lederer & Shirley, 1978; RHH, 1970].

O valor de α é arbitrário e o usado para o cálculo do limite de detecção para as amostras analisadas nesse trabalho foi de 0.05. Isso significa que existe um erro de 5 % de chance de se concluir de maneira errada o valor da amostra. Com isso a Equação 2.13 fica:

$$LID = \frac{(4.66)}{G \varepsilon_p f} \sqrt{C_F} \quad (2.14)$$

Dividindo-se a Equação 2.14 pela massa da amostra em kg, obtém-se o valor do limite inferior de detecção em unidades de concentração. Nesse trabalho, o LID ficou em 7 Bq.kg^{-1} para o ^{137}Cs e 75 Bq.kg^{-1} para o ^{40}K , quando foi utilizado o detector de NaI(Tl) plano. Para o detector de NaI(Tl) com poço, os valores de LID ficaram em 15 Bq.kg^{-1} para o ^{137}Cs e 118 Bq.kg^{-1} para o ^{40}K . Para o detector de HPGe, os valores de LID são desprezíveis para o ^{137}Cs e 60 Bq.kg^{-1} para o ^{40}K .

Capítulo 3

Acúmulo e distribuição de sais minerais em vegetais

Nesse capítulo serão apresentados aspectos importantes para compreensão dos principais mecanismos de absorção, transporte e acúmulo de nutrientes e substâncias radioativas em vegetais. Além disso, serão apresentados alguns modelos radioecológicos que permitam verificar como o ^{137}Cs e o ^{40}K podem ser transportados e distribuídos ao longo das plantas.

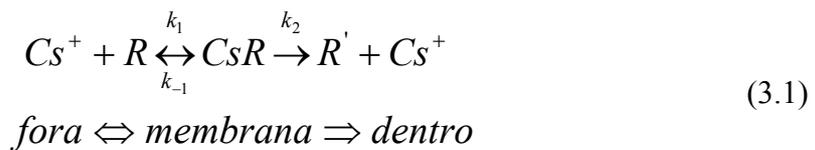
3.1 Absorção de ^{137}Cs e ^{40}K pelas raízes dos vegetais

Como já foi mencionado antes, os vegetais analisados foram cultivados numa região de acidente radiológico e por isso o ^{137}Cs que está presente no solo é absorvido pelas raízes das plantas. Essa absorção se dá na forma de íons, que no caso do céσιο tem a forma monovalente (Cs^+). Existem outros elementos naturais que estão presentes no solo também na forma monovalente, pois são da mesma série homóloga que o céσιο, como é o caso do potássio (K^+) e do amônio (NH_4^+) [Shaw & Bell, 1991]. Em decorrência do acidente nuclear de Chernobyl, a competitividade entre esses elementos tem sido estudada principalmente para plantas de clima temperado. Entretanto, alguns trabalhos já estão sendo realizados para plantas de clima tropical [Simon *et al.*, 2002; Mosquera *et al.*, 2006; Carvalho *et al.*, 2006; Anjos *et al.*, 2007]. Os principais resultados têm mostrado que as variações nas concentrações de sais de potássio e amônio no solo interferem na absorção de céσιο pelas raízes das plantas [Shaw & Bell, 1991; Shaw *et al.*, 1992; Belli *et al.*, 1995; Smolders *et al.*, 1996; Zhu, 1998; Zhu *et al.*, 2002]. Entretanto, a maioria desses trabalhos relata estudos que enfocavam o comportamento da absorção de Céσιο em relação à concentração do potássio no solo. Por outro lado, correlações entre as concentrações de potássio e de céσιο no interior das plantas têm sido pouco estudadas [Jones *et al.*, 1991].

A absorção desses elementos pelas raízes das plantas pode ser estudada usando a Cinética de Michaelis-Menten (MM). Esse mecanismo é muito utilizado nas áreas da Química e da Biologia no estudo de catálise enzimática. Ele apresenta-se como um método simples de um ponto de vista matemático [Kosmidis *et al.*, 2004]. A Cinética de MM descreve o comportamento de alguns elementos solúveis (enzimas), sendo válida

somente quando a concentração desse elemento solúvel é muito inferior à concentração do substrato (isto é, a concentração do elemento é limitada).

Shaw & Bell (1989), estudaram a variação da taxa absorção de Cs^+ pelas raízes do trigo com o aumento da concentração de Cs^+ no solo. Utilizando a Cinética de MM, eles propuseram uma equação geral para o estudo da absorção de Césio pela membrana das raízes. Essa equação era descrita como:



Onde: Cs^+ é o íon de ^{137}Cs ; R é um portador metabolicamente produzido, submetendo-se a uma mudança de adaptação para R' ; CsR é um complexo instável portador do íon Cs^+ e; k_i são os valores dos coeficientes associados a cada etapa i . A equação 3.1 é muito similar a uma equação de catálise enzimática. Assim, utilizando-se a equação de MM obtém-se que [Kosmidis et al., 2004]:

$$v = \frac{v_{max}S}{K_M + S} \quad (3.2)$$

Onde: v e v_{max} referem-se à taxa e taxa máxima de absorção de Cs^+ pelas raízes; S é a concentração de Cs na solução (utiliza-se alternativamente $[Cs]_{ext}$) e K_M é a constante de MM, dada por:

$$K_M = \frac{k_2 + k_{-1}}{k_1} \quad (3.3)$$

Epstein *et al.* (1963) realizaram o mesmo procedimento para calcular a variação da taxa absorção de potássio em raízes de cevada. A Figura 3.1 mostra um comparativo para os valores de v para íons de Cs^+ e K^+ . Na figura 3.1 pode ser visto o comportamento de Cs^+ em função do aumento desse elemento no solo em duas escalas. No sistema 1 o acréscimo de Cs^+ no solo acontece de maneira lenta, variando de

centésimos a décimos de mM de Cs. Já o sistema 2 mostra o comportamento de Cs em variações mais largas desse elemento no solo, num intervalo de 1 a 50 mM de Cs. Nota-se que o comportamento da equação de MM para os dois elementos é semelhante, mostrando que a absorção desses elementos parece seguir mecanismos semelhantes.

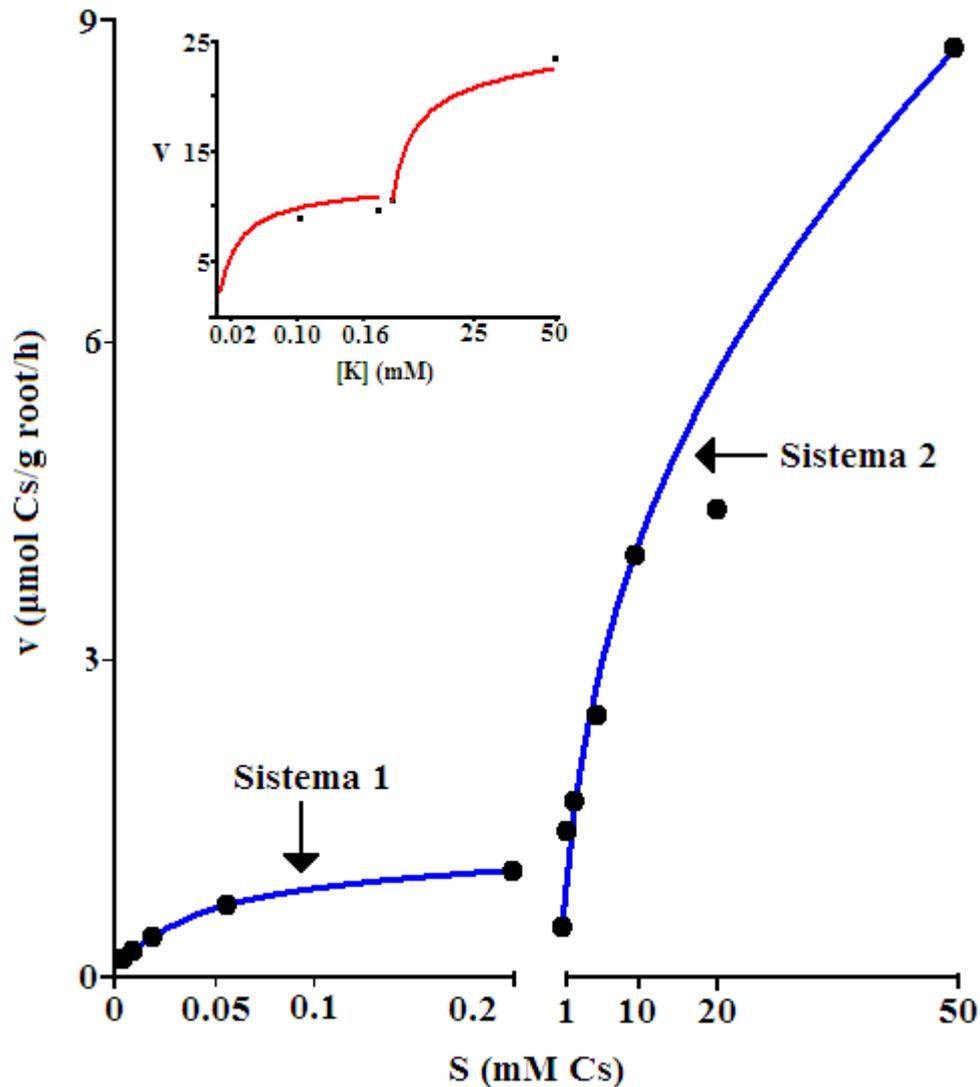


Figura 3.1: Comportamento da taxa de absorção de Cs^+ (v) em função do aumento da concentração de césio no solo (S). O gráfico menor mostra que o mesmo tipo de análise realizada por Epstein et al. (1963) para a taxa de absorção de potássio [Shaw & Bell, 1989].

Apesar da Cinética de MM ser um mecanismo de fácil utilização, ela só pode ser empregada para a avaliação da taxa de transferência entre um elemento presente no solo e as raízes de uma determinada planta que esteja sendo cultivada nesse solo. No caso do

estudo de vegetais de grande porte, o estudo do acúmulo e transporte desses elementos nos compartimentos superiores de uma determinada planta (tais como folhas, frutos, galhos), é necessário buscar novos métodos que ajudem na compreensão desses mecanismos.

3.2 Fator de transferência solo-planta

O Fator de Transferência entre um sistema solo-planta (FT) ou FT (*transfer factor*) é a maneira mais simples de se avaliar a quantidade de um determinado elemento, presente no solo, que é absorvido por um vegetal. Esse parâmetro é considerado um dos mais importantes na avaliação ambiental após acidentes nucleares e/ou radiológicos, ou em outras situações que exponham o meio-ambiente à contaminação por radionuclídeos [IAEA, 1994]. O objetivo fundamental do conhecimento de valores de FT para vários vegetais é o de prever a concentração de certo radionuclídeo num determinado compartimento de um dado vegetal, através da estimativa da concentração desse elemento no solo. Desse modo, a expressão para o cálculo do fator de transferência de um sistema solo-planta, recomendada pela Agencia Internacional de Energia Atômica [IAEA, 1994], é definida como

$$TF = \frac{C_i^{Planta}}{C_i^{Solo}} \quad (3.4)$$

Onde: C_i^{Planta} e C_i^{Solo} representam as concentrações de um radionuclídeo i (em unidades de $Bq \cdot kg^{-1}$, obtido através do uso da massa seca da amostra), determinadas no interior de uma planta e no solo, respectivamente. Contudo, alguns autores preferem expressar o FT em unidades de massa úmida (*in natura*), quando o FT é referente a um

compartimento comestível da planta (tais como frutos) uma vez que esses alimentos, na maioria das vezes, não são consumidos desidratados [Carini, 2001].

3.2.1 Fator de transferência solo-raiz – competição entre Cs^+ e K^+

O FT pode ser calculado para qualquer compartimento de uma planta. Inclusive para a avaliação da transferência de radionuclídeos entre o solo e a raiz. Este procedimento permite comparar seus valores com os obtidos pela equação de MM, através da divisão da Equação 3.2 por S (concentração de Cs no solo). Adicionalmente é possível fazer uma avaliação temporal de seu comportamento, multiplicando o resultado desta divisão pelo tempo de amostragem. A Figura 3.2 apresenta este tipo de estudo realizado por Shaw & Bell (1989). Seus resultados mostram que entre os valores de concentrações de $2 \times 10^{-4} \mu\text{M}$ e $2 \times 10^{-2} \mu\text{M}$ de césio no solo, o FT para esse elemento mantém um valor constante (Figura 3.2a). Após esse limite superior, o aumento da concentração de césio no solo faz com que o FT caia exponencialmente (Figura 3.2b). Curiosamente, este mesmo comportamento foi observado para o potássio [Epstein et al., 1963]. Entretanto, outros trabalhos encontrados na literatura não concordam com um comportamento semelhante do FT para césio e potássio.

Simon *et al.* (2002) analisaram a absorção de ^{137}Cs e ^{40}K em plantas nativas das Ilhas Marshall, local onde os EUA realizaram testes nucleares na década de 50. Eles observaram que os valores do FT para esses radionuclídeos, incluindo algumas plantas tropicais tais como coqueiros, apresentavam um comportamento diferente em função do aumento de desses elementos no solo, como mostra a Figura 3.3. Note que para ^{137}Cs o FT tem um comportamento médio constante enquanto que para o ^{40}K o valor médio do FT vai diminuindo com o aumento de potássio no solo.

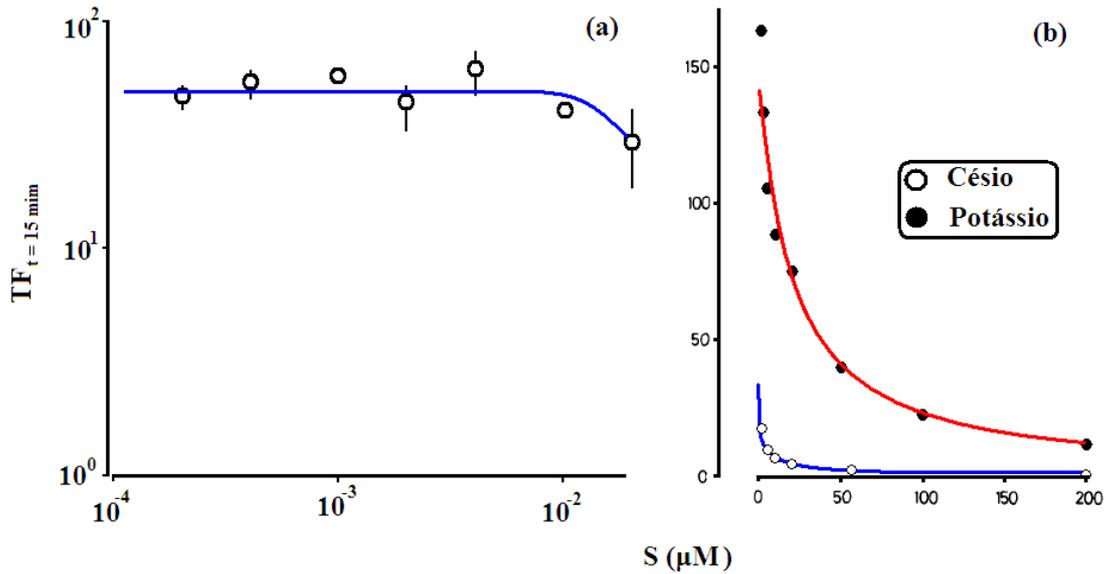


Figura 3.2: (a) Valores de FT sobre uma escala de concentração no solo de 10^{-4} a 10^{-2} μM de Cs. As barras verticais representam o desvio padrão dos valores de FT. (b) Valores de FT teóricos e experimentais calculados para Césio e Potássio numa escala de 0 a 200 μM de concentração no solo (Os valores de FT para Potássio foram retirados de Epstein et al., 1963) [Shaw & Bell, 1989].

É absolutamente natural que isso aconteça, uma vez que para a utilização do FT como um modelo que explique os mecanismos de migração dos nutrientes em ecossistemas vegetais é levado em consideração que existe um equilíbrio estático no sistema solo-planta e assim os valores de FT teriam um comportamento linear, ou seja, o FT é uma aproximação e somente válida em condições específicas. Por isso, trabalhos na literatura mostram que existe uma variação de até 25 vezes nos valores de FT para plantas cultivadas num mesmo local, mas em diferentes fases de crescimento [Ávila, 1998].

Outro fator que deve ser avaliado no estudo da absorção de césio e potássio pelas raízes dos vegetais é a possível correlação existente entre esses elementos. Alguns autores vêm mostrando que existe certa competição entre esses elementos, tanto na absorção pelas raízes [Shultz, 1965; Livens & Loveland, 1988; Simon et al., 2002; Zhu et al., 2002] quanto no interior das plantas [Shaw & Bell, 1991; Shaw et al., 1992].

Esses trabalhos mostram que o aumento na concentração de potássio no solo inibe a absorção de césio pelos compartimentos das plantas.

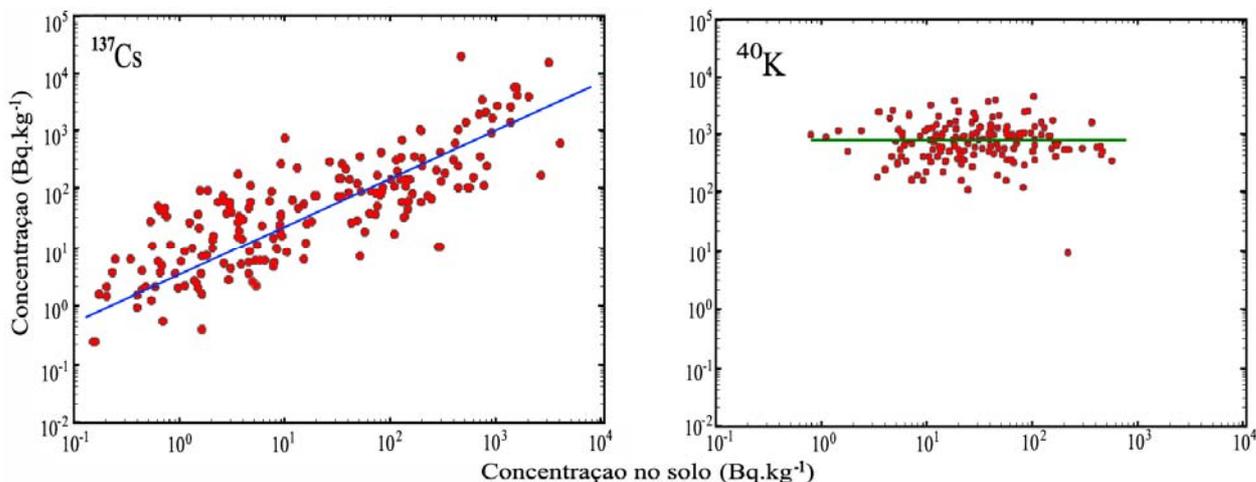


Figura 3.3: Concentração de ^{137}Cs e ^{40}K em plantas cultivadas nas Ilhas Marshall em função das concentrações desses elementos no solo [Simon et al, 2002].

A investigação dos mecanismos de absorção de íons de K^+ pelas raízes das plantas tem sido realizada com grande intensidade. A base destes estudos pressupõe que a absorção desses elementos ocorre através de dois mecanismos principais, denominados de modo transportador e modo canal [Zhu & Smolders, 2000]. O modo transportador é predominante em baixas concentrações de potássio no solo e segue uma seqüência preferencial de absorção de íons, na seguinte ordem: $\text{K}^+ > \text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{Na}^+ > \text{NH}^+$ [Schachtman & Schroeder, 1994]. Por outro lado, o modo canal está relacionado com altas concentrações de potássio no solo e, sua seqüência preferencial de absorção de íons é alterada para: $\text{K}^+ > \text{Rb}^+ > \text{Na}^+ > \text{Cs}^+$ [Schachtman et al., 1992, Zhu & Smolders, 2000]. Assim, é possível dizer que quando as concentrações externas de potássio aumentam, os mecanismos de absorção mudam do modo transportador para o modo canal e como nesse mecanismo a diferença na preferência de absorção entre potássio e césio é significativamente maior, a absorção de césio diminui. Zhu et al.,

2000 estudaram o comportamento de FT para ^{137}Cs em trigos cultivados em solução hidropônica em função do aumento da concentração ^{137}Cs na solução em duas situações diferentes: uma com e outra sem adição de potássio na solução. A Figura 3.4 apresenta a evolução dos valores de FT em função da variação da concentração de ^{137}Cs , onde é possível observar que para o segundo caso, o valor médio de FT de ^{137}Cs foi cerca de 5 vezes superior quando comparado com o caso em que foi adicionado potássio na solução.

3.2.2 Fator de Transferência Solo-Compartimento

Como mencionado anteriormente, além de se avaliar a transferência de íons entre as membranas celulares das raízes, o cálculo de FT pode ser usado para estimar a quantidade de que certo elemento ou composto químico pode ser acumulada nos compartimentos superiores de uma planta (tronco principal, galhos, folhas e frutos, por exemplo). O objetivo dessa análise é o de compreender o funcionamento dos mecanismos de transporte e acúmulo de nutrientes e substâncias radioativas no interior de determinadas plantas. Desse modo, também é possível estimar a dose interna a que uma pessoa estaria exposta, caso ela consumisse as partes comestíveis desta planta após a ocorrência de um acidente radiológico ou nuclear.

Mais uma vez, estes estudos corroboram o fato de que a transferência de um radionuclídeo específico em um determinado sistema solo-planta é um problema complexo. Uma vez que os valores de FT podem apresentar grandes variações quando a distribuição do radionuclídeo no solo não é homogênea, quando há alterações na composição e condições de umidade do solo, clima ou qualquer outra característica do ecossistema. Estudos encontrados na literatura mostram que os valores de FT apresentam variações de um fator 10 a um fator 100. Em alguns casos, esta variação é

ainda superior [Tome *et al.*, 2003; Carini, 2001, IAEA, 1994; Sheppard and Eveden, 1990; Ng et al., 1982].

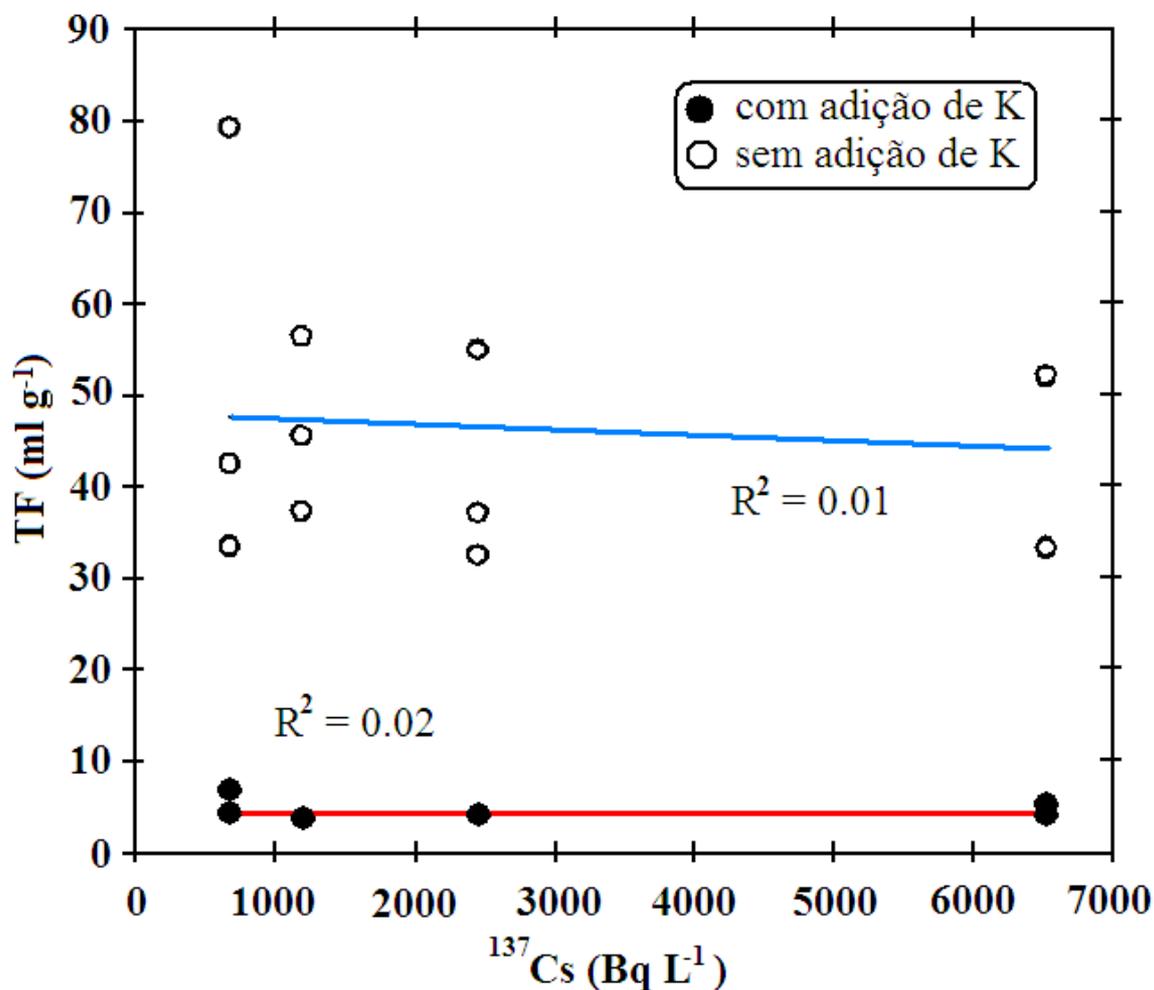


Figura 3.4: Fator de Transferência (FT) solução-raiz para ^{137}Cs em função do aumento da concentração de ^{137}Cs na solução no caso de: adição e não adição de potássio na solução [Zhu *et al.*, 2000].

Como o valor de FT está relacionado com a transferência de sais minerais entre o solo e os compartimentos das plantas, alguns mecanismos biológicos e as características do solo exercer grande influência na absorção de radionuclídeos [Carini, 2001; Papastefanou *et al.*, 1999]. Dentre eles podem ser destacados:

Características físico-químicas do solo: A concentração dos elementos químicos no solo depende da umidade do solo, do seu pH, do potencial de troca de cátions (CEC - *Cation Exchange Capacity*), do potencial redox, da quantidade de matéria orgânica, da

atividade microbiana e da aplicação de fertilizantes. O fluxo de massa e a difusão dos elementos químicos dependem da estrutura e da porosidade do solo.

Interceptação das raízes: Enquanto as raízes crescem, sua superfície fica em contato mais próximo com os elementos químicos.

Absorção de íons pelas raízes: A absorção é uma característica da estrutura genética da planta. As espécies de plantas diferem consideravelmente em seu CEC, isto é, número de locais de trocas em sua parede celular. No geral, o CEC das espécies dicotiledôneas é maior que o das espécies monocotiledôneas.

Transporte de íons: O transporte de íons através das membranas das raízes depende das diversas propriedades físico-químicas desses íons.

Translocação de íons: O transporte por longas distâncias dos íons acontece nos sistemas vasculares do xilema e do floema. Quando o transporte pelo xilema for unidimensional, o transporte pelo floema será bidirecional, sendo determinado pelas necessidades nutritivas dos vários órgãos ou tecidos da planta.

Redistribuição de nutrientes minerais: A redistribuição de nutrientes das folhas para os órgãos de armazenamento (tronco principal, galhos) é um processo importante que acontece nas plantas perenes (com vida maior que dois anos), antes da queda das folhas.

Transpiração das raízes: As secreções das raízes podem mobilizar nutrientes mineiras, mas, primeiramente, fornecem energia para a atividade microbiana na rizosfera, que é a região do solo influenciada pelas raízes, com máxima atividade microbiana.

Micorriza: Constitui uma associação simbiótica entre certos fungos e algumas raízes de plantas, geralmente árvores.

Em um extenso trabalho, Carini (2001) fez um levantamento dos valores de FT, obtidos por vários pesquisadores, para frutos de diferentes espécies de plantas, cultivadas em diversas configurações ambientais. Os resultados mostraram que a transferência de diferentes radionuclídeos para um mesmo fruto pode variar em até 6 ordens de grandeza. Adicionalmente, mantendo-se fixos o radionuclídeo e o tipo de fruto, os valores de FT variam significativamente com a alteração das propriedades do solo. A Tabela 3.1 mostra uma coleção de valores de FT de ^{137}Cs para maçãs, calculado em unidades de Bq.kg^{-1} de massa úmida por Bq.kg^{-1} de massa seca do solo.

Tabela 3.1: Valores do FT para Cs de macieiras em diferentes tipos de solo, contaminação e experimento [Carini, 2001].

Planta	Parte do fruto	TF (Cs)	Referência
Macieiras	Fruto	2.4×10^{-3}	Delmas et al. (1973)
		1.9×10^{-2}	Ng et al. (1979) e Boone et al. (1981)
		4×10^{-3}	Roussel et al. (1984)
	Lavada e sem caroços	8.6×10^{-4}	Green et al. (1997)
		9.4×10^{-4}	Green et al. (1997)
		1.85×10^{-3}	Green et al. (1997)
		3.7×10^{-2}	Green et al. (1997)

Assim, devido a grande flutuação nos valores de FT solo-compartimento, a sua utilização na estimativa da taxa de dose interna numa pessoa devido à ingestão de alimentos contaminados não é muito confiável. O que costuma ser feito é utilizar valores médios de FT, entretanto devido a essa grande variação as incertezas para esses valores médios tornam-se muito grande.

Uma maneira de minimizar essas incertezas tanto nos valores das taxas de dose quanto nas conclusões sobre o comportamento dos radionuclídeos no interior das plantas, é a utilização de valores de FT oriundos de locais com características do solo e clima semelhantes. Uma análise detalhada de locais próximos a regiões em que possam ocorrer emergências radiológicas ou nucleares pode ser uma excelente forma de prevenção sobre o comportamento radioecológico desse ecossistema. Com isso, é importante possuir uma grande base de dados de valores de FT oriundos de diferentes variedades de plantas e diferentes condições do planeta.

3.3 Distribuição e transporte de césio e potássio nos vegetais

Após serem absorvidos pelas raízes, os nutrientes são transportados pelo interior das plantas, seguindo mecanismos biológicos específicos à necessidade de cada vegetal. Apesar dos processos de absorção serem iguais para íons monovalentes, como Cs^+ , K^+ e o NH_4^+ , o papel fisiológico de cada um desses elementos é diferente e, por isso, os seus mecanismos de transporte também são distintos.

3.3.1 Potássio

O potássio é o segundo nutriente mineral requerido em maior quantidade pelas espécies vegetais, depois do nitrogênio. Possui absorção altamente seletiva, alta mobilidade intracelular e nos tecidos e facilidade no transporte à longa distância, via xilema e floema. O potássio é abundante no citoplasma e, quando associado aos ânions,

contribui com o potencial osmótico celular dos vegetais. Por varias razões, possui papel fundamental na relação água-planta [Hsiao & Läunchli, 1986]. O K não é metabolizado na planta e forma ligações com moléculas orgânicas de fácil reversibilidade. Além disso, é o íon mais abundante nas células vegetais [Marschner, 1995]. A alta mobilidade do potássio é objeto de muitos trabalhos encontrados na literatura. Estudos sobre o efeito da variação da concentração de potássio nas folhas de lichieira (*Litchi chinensis*) observaram que seus valores diminuem no período de frutificação, chegando, às vezes, a níveis de deficiência [Salomão *et al.*, 2005].

3.3.2 Césio

Os íons de Cs^+ são escassos na natureza, diferentemente do K^+ e, portanto, pouco se sabe sobre o seu comportamento fisiológico. *Buyse et al.* (1995) mediram a circulação de ^{137}Cs em espinafre e verificaram que a quantidade de ^{137}Cs que retorna à raiz, como função do ^{137}Cs transportado pelo xilema, varia em torno de 75 % a 95 %. Valores maiores do que a mesma medida para o K. Este fato mostra que o Cs pode ser transportado de maneira bem eficiente através do xilema [Zhu & Smolders, 2000]. Trabalhos realizados após o acidente de Chernobyl mostraram que o ^{137}Cs se acumula preferencialmente nas partes de crescimento, entretanto, esses estudos tratam apenas de árvores lenhosas de clima temperado.

Tobler, Bajo & Wyttenbach (1988) observaram um acúmulo elevado de ^{137}Cs nos pequenos galhos. As concentrações de ^{137}Cs em diferentes partes das plantas mostram que os pequenos galhos e as folhas tendem a conter os maiores valores [McGee *et al.*, 2000]. A Figura 3.5 mostra outros resultados realizados por McGee *et al.* (2000) em três tipos de plantas diferentes: *Picea abies* e *Pinus sylvestris* (coníferas) e

Betula sp (videiras). Foram analisadas amostras de parte interna do tronco principal, de casca, de galhos, ponta dos galhos e folhas dessas três árvores. Note que, para as coníferas, os maiores valores de concentração estão nos galhos pequenos, seguido das pontas dos galhos, folhas e, por último, o tronco principal. Já para as videiras, as concentrações de ^{137}Cs no tronco principal também são menores, tendo os outros compartimentos concentrações praticamente constantes.

Além disso, as concentrações no tronco principal antes e depois do acidente de Chernobyl não parecem sofrer alterações. Kohno, Koizumi Okumura & Mito (1988) examinaram a distribuição de ^{137}Cs em dois anéis de crescimento de árvores correspondentes aos anos de 1914 e 1979 e mostraram que não existiu nenhuma relação com a concentração de ^{137}Cs e o período de testes de armas nucleares, concluindo que o césio pode penetrar pelo tronco através dos anéis etários.

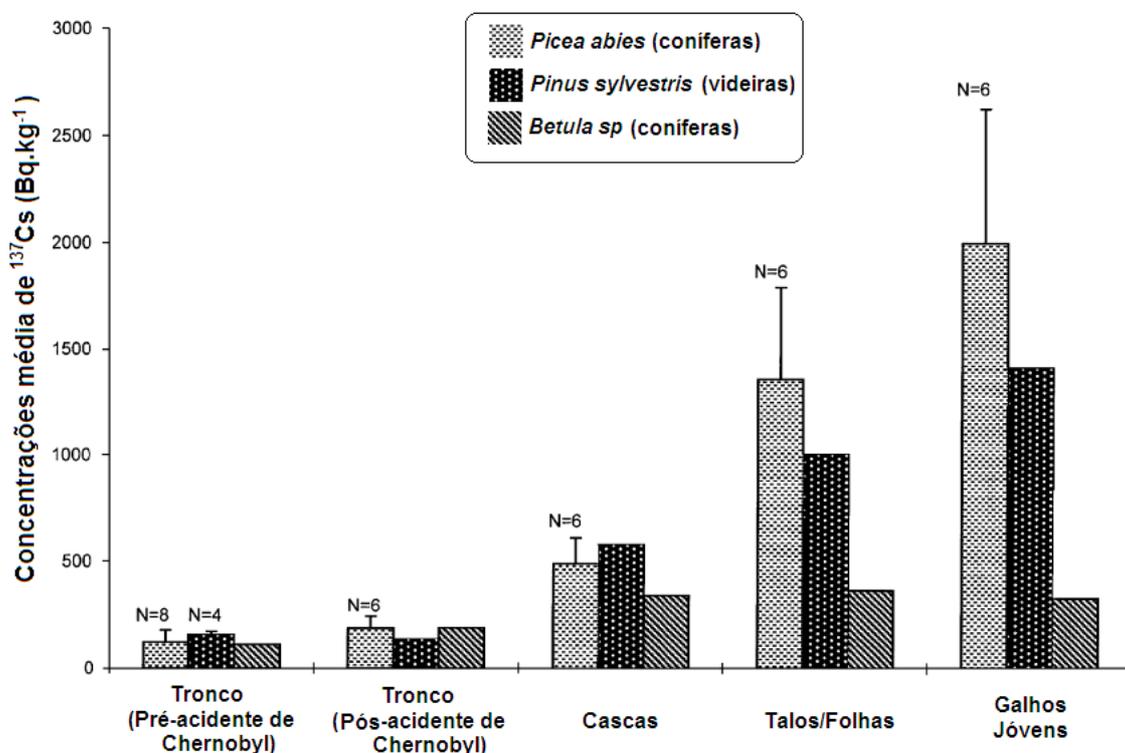


Figura 3.5: Distribuição de ^{137}Cs em compartimentos de 3 tipos de plantas de clima temperado de florestas da Suécia [McGee et al., 2000]

Esses resultados são corroborados por outros trabalhos existentes na literatura [Myttenaere *et al.*, 1993; Gommers *et al.* 2000 e Mosquera *et al.*, 2006]. Esse último trabalho foi realizado pelo nosso Grupo, que pesquisou plantas frutíferas de clima tropical, cultivadas em um dos locais onde ocorreu o acidente radiológico de Goiânia em 1987. Foram analisadas concentrações de ^{137}Cs em amostras de galhos (parte interna e casca), folhas e frutos de duas goiabeiras, uma mangueira e um abacateiro. Cada um desses compartimentos foi ainda subdividido em função de sua idade (amostras velhas e jovens). Os resultados mostraram que o céσιο apresenta um maior acúmulo nas partes mais jovens da planta. Por exemplo, houve uma maior concentração de ^{137}Cs nas partes de crescimento (galhos pequenos, folhas e frutos) quando comparado com os órgãos mais antigos da planta (tronco principal e raízes). Além disso, observou-se que também houve um decréscimo da concentração de ^{137}Cs em função da idade de um dado compartimento ou órgão. Por exemplo, folhas jovens apresentavam maior acúmulo quando comparado com folhas adultas ou folhas amareladas. Este comportamento é semelhante ao observado em algumas plantas de clima temperado. A Tabela 3.2 mostra os resultados desse trabalho, em que estes efeitos podem ser observados.

Entretanto, existem trabalhos que não concordam que o ^{137}Cs se acumula em maior quantidade nas partes mais jovens. Djingova & Kuleff (2001) mostraram que folhas mais jovens de plantações de milho apresentavam menores valores de concentrações de ^{137}Cs que nas folhas mais velhas. Observações similares foram encontradas por outros autores [Savidis, 1988; Savidis, Drossos & Heinrich, 1990]. Já estudos em pés de damascos mostraram que não há variação da concentração de Cs com o envelhecimento das folhas [Antonopoulos-Domis *et al.*, 1990]. Assim, este

comportamento parece estar fortemente relacionado com a espécie vegetal, confirmando a importância de se analisar várias espécies de plantas.

Tabela 3.2: Valores de concentração para ^{137}Cs para duas goiabeiras (G1 e G2), uma mangueira e um abacateiro em 4 diferentes compartimentos das plantas. Estes foram ainda subdivididos em partes jovens e partes velhas [Mosquera et al., 2006].

Árvores	Amostras	Concentrações médias de ^{137}Cs (kBq.kg ⁻¹)	
		Partes Jovens	Partes velhas
Goiabeira (G1)	Tronco	1.2 (0.2)	0.8 (0.1)
	Casca	3.9 (0.6)	2.3 (0.1)
	Folhas	4.7 (0.9)	2.4 (0.2)
	Frutos	5.6 (0.7)	2.2 (0.2)
Goiabeira (G2)	Tronco	0.7 (0.2)	0.7 (0.3)
	Casca	1.8 (0.3)	1.7 (0.3)
	Folhas	2.3 (0.3)	1.8 (0.2)
	Frutos	2.0 (0.2)	2.1 (0.4)
Mangueira	Tronco	2.0 (0.2)	1.0 (0.1)
	Casca	2.7 (0.1)	1.7 (0.3)
	Folhas	2.5 (0.2)	1.2 (0.1)
	Frutos	3.6 (0.2)	2.7 (0.2)
Abacateiro	Tronco	3.3 (0.3)	1.8 (0.4)
	Casca	3.6 (0.3)	2.7 (0.3)
	Folhas	2.3 (0.2)	1.4 (0.2)

3.3.3 Taxa de acúmulo entre céσιο e potássio

Na literatura é possível observar vários estudos sobre o comportamento do céσιο em plantas. Também há vários trabalhos que tentam confrontar a absorção de céσιο e potássio através de estudos de sistemas solo-planta. Poucos, entretanto, fazem uma avaliação do comportamento simultâneo destes elementos nos órgãos superiores

das plantas com a finalidade de avaliar a existência de uma correlação entre estes dois elementos. Talvez isto ocorra devido ao fato de que os poucos dados disponíveis indiquem que este é um problema complexo.

Ciuffo *et al.* (2002) realizaram um estudo em amostras de solo e de plantas nos Alpes de Giulia na Itália. Eles observaram uma correlação negativa entre os valores de FT solo-planta para ^{137}Cs e ^{40}K . Os valores observados de FT para apresentavam grandes flutuações, enquanto que para o potássio esses valores apresentavam uma baixa variação. Os autores atribuem essa correlação negativa a vários fatores externos, muitos já discutidos nesse capítulo, como: características químicas do solo, propriedades físicas e mineralógicas, espécie da planta, diferença entre os genótipos, exigências fisiológicas, atividade e disponibilidades dos elementos.

Outros autores atribuem uma não correlação entre os valores de FT desses radionuclídeos, devido a ocorrência de uma possível competição desses elementos durante a absorção pelas raízes [Djingova & Kuleff, 2001]. Knatko *et al.* (2000) calculou concentrações de ^{137}Cs em batatas cultivadas em territórios da Bielo-Rússia e encontrou uma diminuição nos valores de seu FT em função do aumento da concentração de K_2O no solo. Os autores sugerem que a utilização do FT como ferramenta de avaliação da taxa de acúmulo desses radionuclídeos nos compartimentos das plantas seja feita sempre após uma avaliação das concentrações de césio e potássio em um perfil no solo, uma vez que a sua utilização do cálculo de FT só faz sentido em um solo com distribuições homogêneas destes elementos.

Bystrzejewska-Piotrowska & Urban (2004) avaliaram as razões $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ em compartimentos de cebolas (*Allium cepa*) coletadas na região de Warsaw-Ursus, na Polônia. Foram estudadas essas razões no bulbo, em duas camadas externas e nas folhas envelhecidas de cebolas com diâmetro de aproximadamente 50 mm. Eles observaram

que nas camadas hidratadas da cebola existia uma forte correlação ($r = 0,96$) entre o ^{137}Cs e o ^{40}K , de tal modo que a razão entre as concentrações $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K} \approx 0,8$. Por outro lado, esta razão sofria um aumento elevado nas folhas envelhecidas ($^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K} \approx 2,5$). A possível explicação para esse fenômeno, dada pelos autores, seria a existência de um possível mecanismo de redistribuição de nutrientes que acontece com o potássio quando as folhas tornam-se velhas [(Mitchell, 2001; Salt & Kay, 1999 e Tyson *et al.*, 1999)]. A Figura 3.6 mostra os valores de concentração de ^{137}Cs , ^{40}K e $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ para esse trabalho.

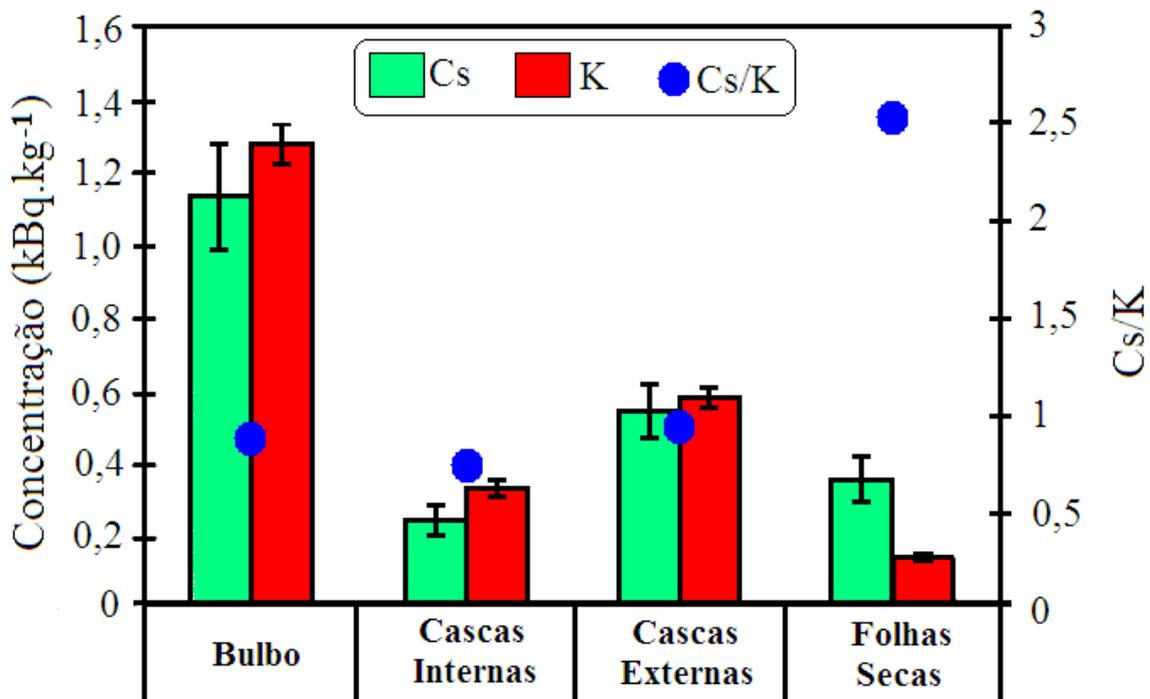


Figura 3.6: Valores de concentrações de ^{137}Cs , ^{40}K e $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ em diferentes compartimentos de cebolas. Note que nas camadas hidratadas da cebola existe uma forte correlação entre o ^{137}Cs e o ^{40}K ($r = 0,96$) e um elevado aumento da razão nas folhas envelhecidas [Bystrzejewska-Piotrowska & Urban, 2004]

Segundo Bystrzejewska-Piotrowska & Urban (2004), fatores importantes que devem ser levados em consideração na comparação entre o comportamento de césio e potássio em organismos vegetais são as características que levaram a contaminação de cada planta.

No caso de contaminação por acidentes nucleares, as plantas absorvem o ^{137}Cs pelas raízes e também pela deposição desse elemento em suas folhas (devido à precipitação radioativa após um acidente nuclear, conhecido como *fallout*). O transporte desses radionuclídeos no interior das plantas tem um comportamento diferenciado, uma vez que depende do mecanismo de absorção. O seu transporte pode ser mais rápido das folhas às raízes que das raízes até as folhas, dependendo da morfologia e das características biofísicas desses órgãos [Bystrzejewska-Piotrowska & Urban, 2003]. Isso acontece porque nas raízes existe um grande número de barreiras controlando o transporte de micro e macro-nutrientes [Lambers et al., 1998; White & Broadley, 2000]. No caso das folhas, essas barreiras são limitadas, além disso, um transporte acrópeto mais rápido de césio ocorre quando as raízes são colocadas em soluções ácidas.

Desse modo, a razão entre ^{137}Cs e ^{40}K pode ser uma excelente ferramenta no entendimento do comportamento entre esses dois radioisótopos no interior das plantas. Entretanto, os diferentes modos de distribuições de césio no meio ambiente interferem diretamente nos valores dessas razões. Por exemplo, tanto acidentes nucleares quanto acidentes radiológicos não produzem distribuições homogêneas deste elemento no solo. Da mesma forma, as concentrações de potássio no solo também variam, seja devido à geologia local da área de cultivo, seja devido aos modos de adubação do solo. Assim, a estimativa das concentrações destes elementos no solo, em geral, é levada em conta no cálculo de suas taxas de acúmulo em um dado vegetal.

A taxa de acúmulo entre os compartimentos (TAC) de uma planta pode ser representada pela expressão:

$$TAC = \frac{{}^{137}\text{Cs}_i / {}^{137}\text{Cs}_{\text{Solo}}}{{}^{40}\text{K}_i / {}^{40}\text{K}_{\text{Solo}}} \quad (3.5)$$

Onde: $^{137}Cs_i$ e $^{137}Cs_{solo}$ são os valores de concentração de ^{137}Cs , em unidades de $Bq.kg^{-1}$ de massa seca, em um dado compartimento i de uma planta (i = tronco principal, galhos, folhas, frutos, etc) e no solo, respectivamente. Analogamente $^{40}K_i$ e $^{40}K_{solo}$, representam as concentrações de ^{40}K em um dado compartimento i da planta e no solo, respectivamente.

Zhu & Smolders (2000) calcularam e relacionaram valores de TAC de alguns trabalhos na literatura, para alguns vegetais e observaram que o potássio é absorvido mais eficientemente do que o céσιο. A maioria dos valores de TAC encontrados nesse e em outros trabalhos disponíveis na literatura estão abaixo de 1 [Zhu & Smolders, 2000; Smolders *et al.*, 1996]. Como pode ser visto na Tabela 3.3, os valores de TAC para esses trabalhos ficaram entre 0,01 e 0,8.

Tabela 3.3: Valores de TAC em diferentes tipos de plantas [Zhu & Smolders, 2000].

Planta	TAC	Referências
Milheto, planta inteira	0.22	Menzel and Heald, 1955
Girassol		Menzel and Heald, 1955
Flores	0.12	
Folhas	0.17–0.20	
Talos	0.10–0.15	
Caule	0.12	
Raízes	0.29	
Cevada, ramos	0.15–0.35	Middleton <i>et al.</i> , 1960
Cevada, raízes	0.06 e 0.50	Middleton <i>et al.</i> , 1960
Feijão, primeiro trifólio	0.1–0.8	Cline and Hungate, 1960
Feijão (diferentes partes)	0.01–0.1	Nishita <i>et al.</i> , 1962
Trigo da primavera, planta inteira	0.04–0.26	Smolders <i>et al.</i> , 1996

Essa variação está relacionada com as diferentes propriedades do solo de cada uma dessas plantas analisadas. O TAC nada mais é do que uma razão entre o FT para

césio e FT para potássio de um determinado compartimento de uma planta específica, e por isso, traz todas as incertezas agregadas à utilização do FT, já apresentados nesse capítulo.

3.4 Distribuição Radial

A avaliação do comportamento radial da concentração de radioisótopos nos anéis de crescimento presentes nos troncos das árvores é de grande importância no estudo da Radioecologia, uma vez que ela pode ser usada como uma fonte de informações tanto da histologia vegetal quanto de acontecimentos históricos que envolveram a liberação de substâncias radioativas no meio ambiente. Assim, os radionuclídeos de meia-vida longa podem ser utilizados como traçadores temporais, permitindo verificar o instante em que ocorreram alterações de suas concentrações no solo e qual o intervalo de tempo em que estes elementos foram absorvidos pelas raízes das plantas [Momoshima & Bondietti, 1994; Kudo *et al.*, 1993].

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura faz uma análise unidimensional dos anéis de crescimentos dos troncos das árvores. Kudo *et al.* (1993) realizaram um trabalho em que foi investigada a concentração de ^{137}Cs e $^{239+240}\text{Pu}$ em árvores cultivadas a alguns quilômetros de distância de Nagasaki, no Japão. O intuito do trabalho era determinar o momento da detonação da bomba nuclear de 1945 na segunda guerra mundial. Foram encontradas concentrações altas de césio em anéis etários correspondentes a anos anteriores do que 1945, mostrando que o césio pode migrar entre os anéis de crescimento. Já o plutônio mostrou ser um traçador mais eficiente para esse tipo de pesquisa, com concentrações abaixo do limite de detecção em anos anteriores a 1945 e valores mais elevados após esta data.

Outros trabalhos avaliaram as concentrações de ^{137}Cs em anéis de crescimento de pinheiros de uma região florestal com alta contaminação devido ao acidente de Chernobyl [Fogh & Andersson, 2001]. Foram avaliados vários troncos de árvores com idades diferentes. A Figura 3.7 mostra o resultado das concentrações de ^{137}Cs para essas árvores. Em todas elas o césio está presente em todos os anéis etários, inclusive em anos anteriores ao acidente nuclear de Chernobyl, indicando novamente a característica migratória do césio [IAEA, 1994].

Assim, esses trabalhos concordam que o ^{137}Cs possui grande mobilidade dentro do tronco e migrar para anéis etários mais antigos, revelando que o césio não seria um traçador temporal eficiente.

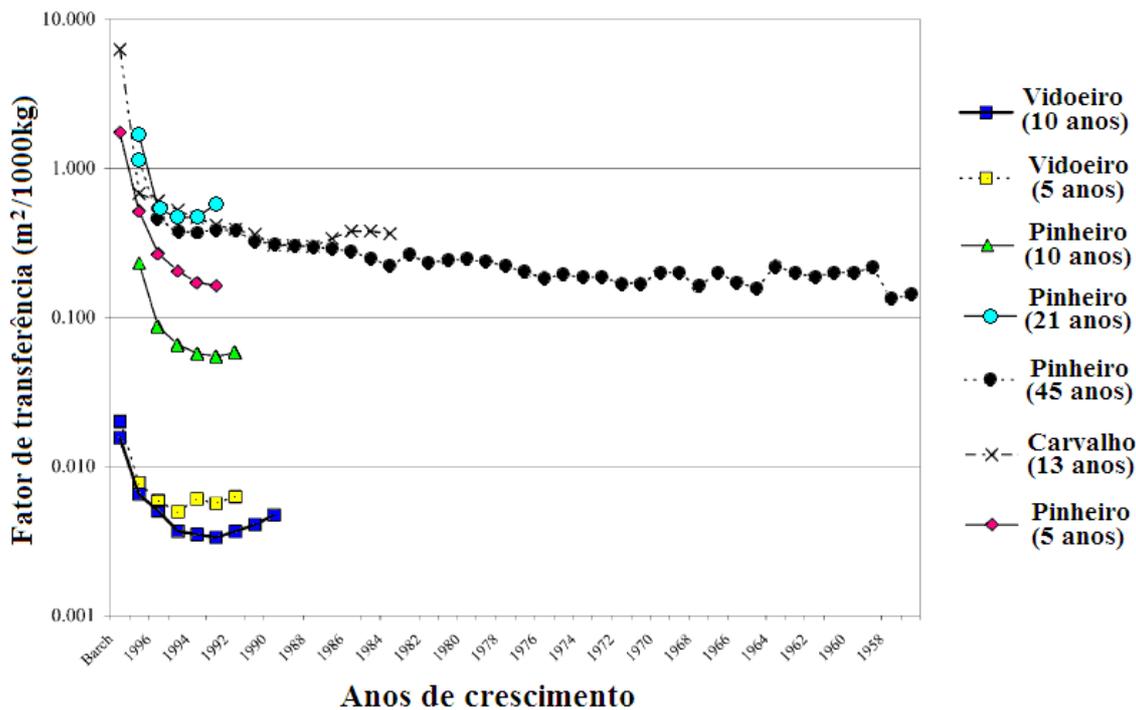


Figura 3.7: Valores de FT para ^{137}Cs em anéis etários de 7 tipos diferentes de árvores lenhosas e de clima temperado. [Bystrzejewska-Piotrowska & Urban, 2003].

Segundo McGee *et al.* (2000), esse comportamento seria devido ao fato do transporte de água ocorrer principalmente através dos elementos inoperantes do xilema,

o que poderia explicar porque o céσιο pode ser encontrado em tecidos mais antigos ao acidente de Chernobyl.

Existem poucos trabalhos na literatura que investigaram o comportamento de ^{40}K nos anéis de crescimento. Kudo *et al.* (1993) também avaliaram as concentrações de ^{40}K no interior do tronco das árvores através dos anéis de crescimento. O potássio não poderia ser usado com um traçador temporal, já que faz parte da composição do solo. Assim, como era de se esperar, os resultados mostraram que o ^{40}K está presente em todos os anéis de crescimento. Entretanto, uma característica interessante pode ser observada na Figura 3.8. A distribuição ^{40}K nos anéis etários do tronco das árvores estudadas tem um comportamento semelhante ao do ^{137}Cs , mostrando que a tendência de migração do céσιο pode estar relacionada com os mesmos mecanismos de transporte do potássio pelo interior do tronco.

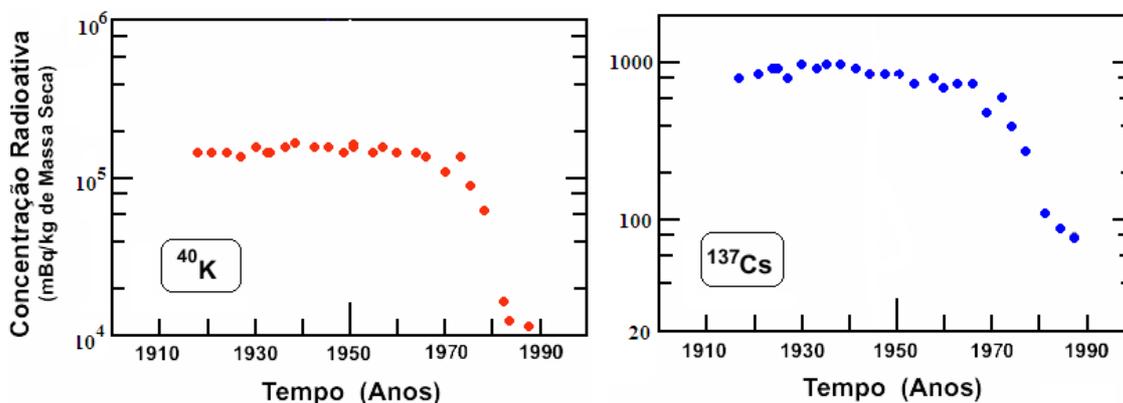


Figura 3.8: Valores concentração de ^{137}Cs e ^{40}K em função dos anéis de crescimento. [Kudo *et al.*, 1993.]

Um trabalho interessante que investigou as concentrações de ^{40}K e ^{137}Cs nos anéis de crescimento de pinheiros de mais de 82 anos de idade no sudeste da Alemanha foi realizado por Haas & Müller (1995). Eles observaram que a concentração de ^{40}K nos anéis etários mais novos são maiores. Isso se deve à alta atividade fisiológica

desses tecidos. A Figura 3.9 mostra o comportamento deste radionuclídeo em função dos anéis de crescimento. Foi observado também um transporte radial desse radionuclídeo de anéis mais antigos para anéis mais jovens.

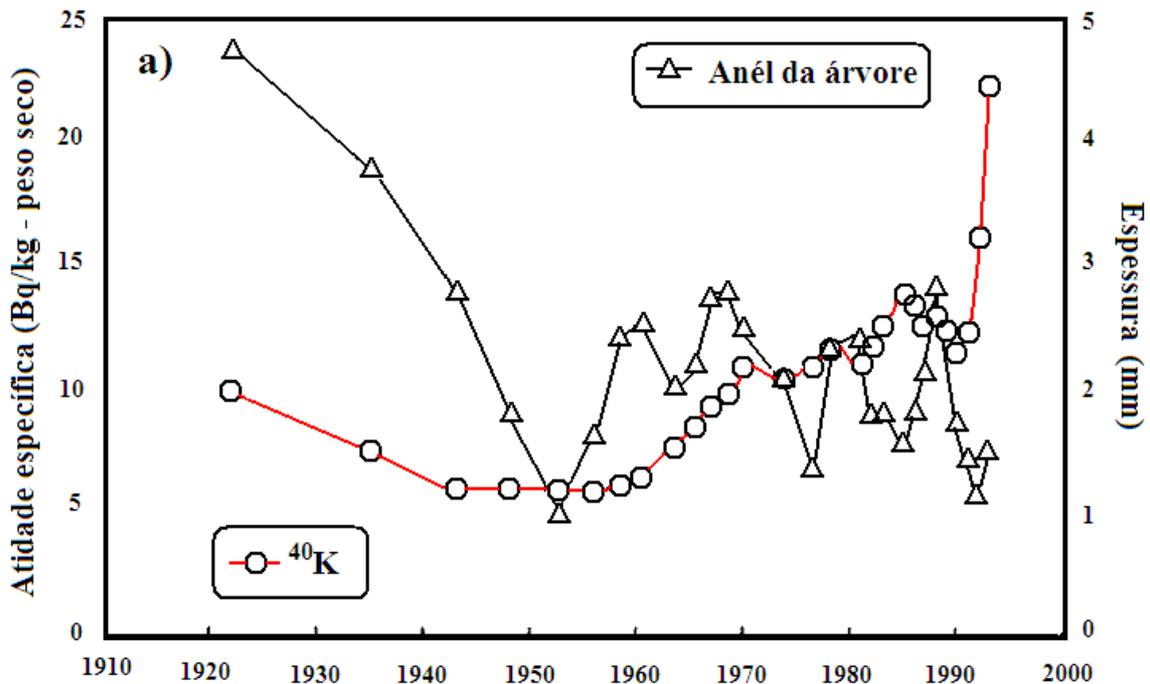


Figura 3.9: Valores concentração de ^{40}K e espessura do anel da árvore em função dos anéis de crescimento [Haas & Müller, 1995].

Segundo este trabalho, o potássio estaria disponível no tronco das árvores em duas frações:

No citosol: Solução com alta quantidade de partículas livres flutuando, onde uma parcela do metabolismo da planta acontece. Esta “sopa” de íons é encontrada em maior quantidade nas células dos anéis mais jovens do tronco. No citosol, o potássio está facilmente disponível podendo ter seu transporte facilitado [Haas & Müller, 1995].

No vacúolo: Ocupam tipicamente mais 30% da planta podendo chegar a 90% do seu volume. O vacúolo abriga uma quantidade grande de uma solução, composta de água,

enzimas, íons inorgânicos (como K^+ e Cl^-), sais (tais como o cálcio) e outras substâncias, incluindo os produtos tóxicos removidos do citosol para evitar a interferência no metabolismo. O potássio não está prontamente disponível no Vacúolo. Sua concentração depende das circunstâncias de crescimento da planta e da disponibilidade de potássio armazenado em anos anteriores.

Haas & Miiller (1995) também avaliaram as concentrações de céσιο nos anéis etários dessas árvores, permitindo uma diferenciação entre o ^{137}Cs proveniente do acidente de Chernobyl e o ^{137}Cs devido a testes nucleares. Segundo eles, isso foi possível uma vez que a concentração de ^{137}Cs devido ao acidente de Chernobyl está diretamente associada à concentração de ^{134}Cs :

$$A(^{137}Cs)_{Chernobyl} = 1,76 \cdot A(^{134}Cs) \quad (3.5)$$

Por outro lado, no caso de testes nucleares a concentração de ^{134}Cs é desprezível. A Figura 3.10a mostra o comportamento do ^{40}K , $^{137}Cs_{Ch}$ (relativo à Chernobyl) e $^{137}Cs_{TN}$ (relativo a testes nucleares) no tronco das árvores estudadas. O ^{137}Cs , assim como o ^{40}K , é encontrado em maior quantidade nos anéis etários mais jovens. Entretanto, nos anéis mais velhos também foi encontrada a presença de céσιο. Os autores sugerem que o ^{137}Cs foi transportado pelos anéis de crescimentos através do parênquima do xilema, comprovando que esse radionuclídeo pode migrar pelos anéis do tronco. Na Figura 3.10b pode-se observar as razões de ^{137}Cs (tanto referente a Chernobyl quanto a testes nucleares) por ^{40}K nos anéis de crescimento dos troncos.

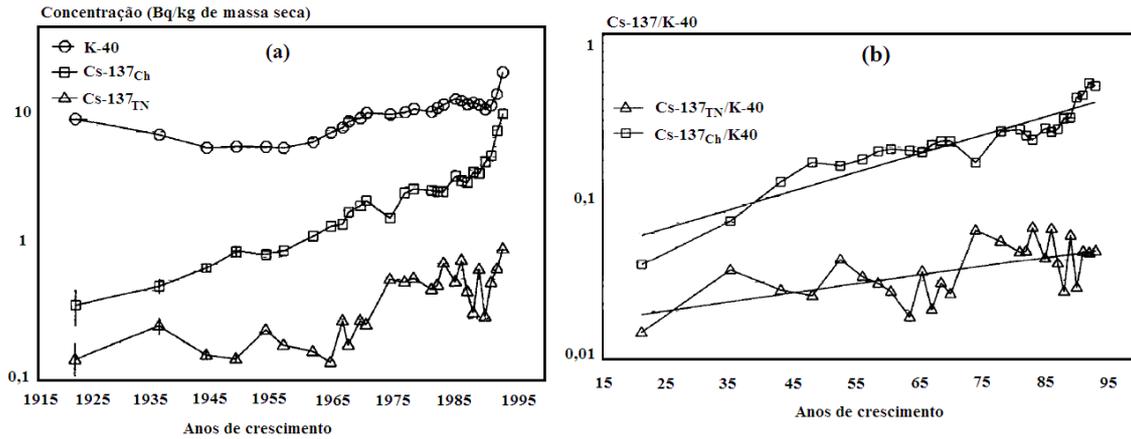


Figura 3.10: a) Valores concentração de $^{137}\text{Cs}_{\text{Ch}}$, $^{137}\text{Cs}_{\text{TN}}$, ^{40}K em função dos anéis de crescimento da árvore; b) Razões de $^{137}\text{Cs}_{\text{Ch}}$ e $^{137}\text{Cs}_{\text{TN}}$ por ^{40}K em função dos anéis etários [Haas & Müller, 1995].

Para o estudo do comportamento radial de radionuclídeos em anéis de crescimento dos troncos das árvores, a maneira da coleta dessas amostras interfere diretamente na apresentação dos dados. Uma das formas para essa coleta é a utilização de um instrumento perfurador na forma helicoidal que faz um corte radial no tronco. Com esse tipo de amostra é possível fazer um gráfico das concentrações desses radionuclídeos em função dos anéis etários de forma unidimensional. Todos os trabalhos citados até aqui sobre comportamento radial desses radionuclídeos utilizaram essa técnica.

O nosso Grupo já realizou alguns trabalhos visando obter informações do comportamento de ^{137}Cs e ^{40}K no interior dos troncos de árvores tropicais. Entretanto, a análise simultânea das concentrações deste elemento apresentou algumas divergências. A análise radial uma goiabeira cultivada em Goiânia (denominada de G1) mostrou que o ^{137}Cs e ^{40}K apresentavam comportamentos diferentes. Já para uma segunda goiabeira G2, seus comportamentos eram semelhantes. A Figura 3.11 apresenta as distribuições radiais destes elementos nas duas goiabeiras.

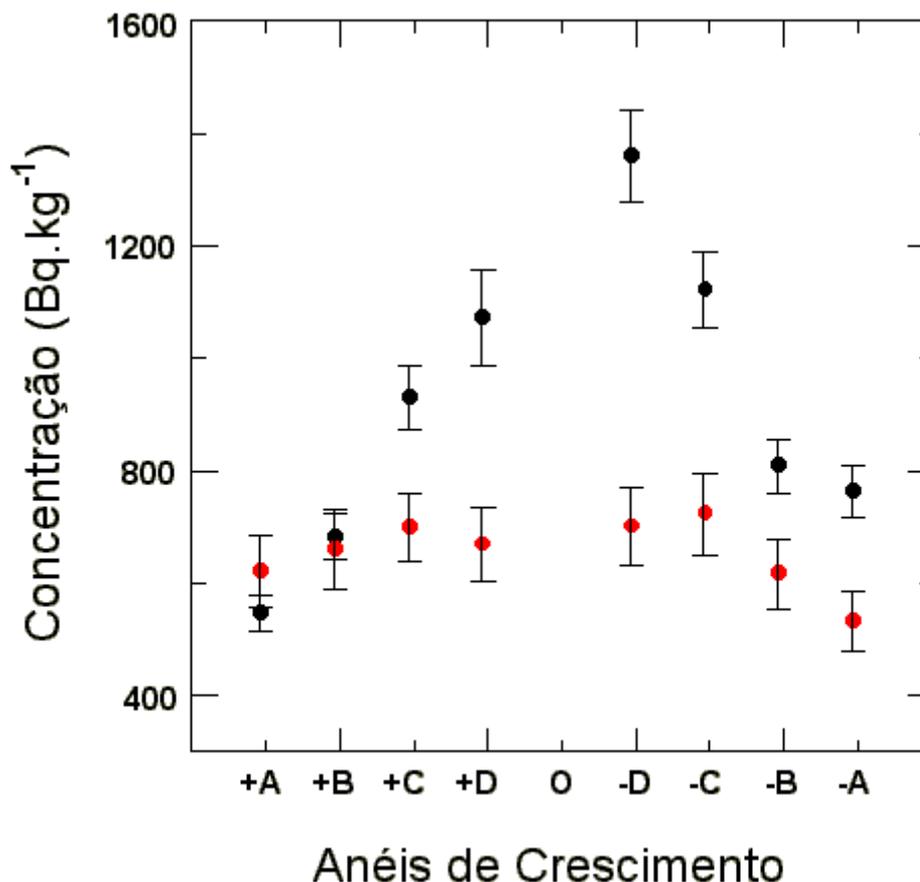


Figura 3.11: Valores concentração de ^{137}Cs e ^{40}K em função dos anéis de crescimento da árvore. A, B, C e D representam os quarto anéis mais externos e O representa o anel central. O sinal “+” representa o lado esquerdo e o sinal “-” representa o lado direito do tronco.

Aparentemente, este efeito estaria associado com as concentrações disponíveis de césio e potássio no solo. Enquanto parece haver um limite máximo de absorção de potássio pelas raízes, o césio parece ser sempre absorvido independente de sua concentração no solo. Em outras palavras, a transferência de potássio parece saturar, enquanto a transferência de césio parece ser sempre constante não apresentando um limite. Este efeito foi observado por Simon *et al.* (2002), conforme apresentado na Figura 3.3.

Com o objetivo de compreender este melhor este fenômeno, no Grupo passou a utilizar uma maneira diferente de coleta das amostras para o estudo da distribuição

radial de ^{137}Cs e ^{40}K . Para tanto, passou-se a retirar uma secção transversal do tronco principal da árvore, na forma de um disco, com o objetivo de compreender a distribuição bidimensional de ^{137}Cs e ^{40}K . Os primeiros resultados deste método apresentados na literatura podem ser vistos na Figura 3.12, que mostra a distribuição de ^{137}Cs nos discos do tronco principal de uma goiabeira.

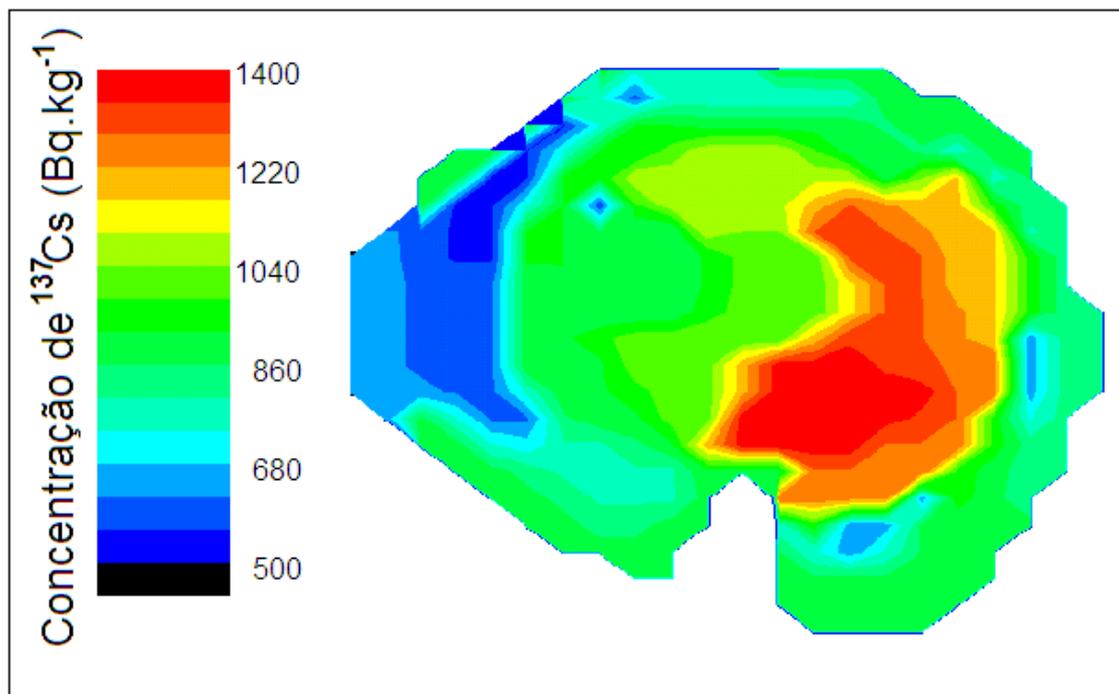


Figura 3.12: Diagrama bidimensional da distribuição radial das concentrações de ^{137}Cs no interior do tronco de uma goiabeira [Mosquera et al., 2006].

Segundo esta figura, o comportamento de ^{137}Cs nos anéis de crescimento de troncos de goiabeiras não é homogêneo e nem simétrico. Numa simples análise unidimensional essa informação não poderia ser observada. Dependendo do local onde o tronco fosse perfurado o comportamento do ^{137}Cs seria completamente diferente. Além disso, esse tipo de análise também revelou a existência de uma tendência de um acúmulo preferencial deste radionuclídeo em um dos lados do tronco. A goiabeira

estudada ficava ao lado de um muro que a impedia de tomar sol em um de seus lados e as concentrações de ^{137}Cs são maiores justamente na região de maior exposição solar.

Atualmente estes estudos estão em andamento e alguns resultados serão apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 4

Resultados

Nesse capítulo serão apresentados os valores encontrados para as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K no solo e no interior dos vegetais, bem como uma interpretação de seus comportamentos em um ecossistema tropical.

Assim, serão apresentados os resultados correspondentes para mandioqueiras, bananeiras, mamoeiros, mangueiras e goiabeiras ao longo de diversos órgãos ou compartimentos (raízes, caule, galhos, folhas, partes comestíveis etc). Diagramas bidimensionais para as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K em cortes transversais do caule e pseudocaule dos mamoeiros e bananeiras, respectivamente, também serão apresentados. Estes têm o objetivo de avaliar o comportamento radial desses radioisótopos no caule das plantas.

Uma vez que os fatores de transferência solo-planta (FT) e as taxas de acúmulo entre os compartimentos (TAC), conforme descrito no Capítulo 3, têm se apresentado pouco eficientes em predizer o valor da dose no indivíduo (devido às grandes incertezas relacionadas à determinação da concentração de ^{137}Cs em solo contaminados), neste capítulo, serão propostas novas ferramentas que busquem minimizar os erros em estimativas da dose interna que um indivíduo possa estar exposto na ocorrência de uma emergência radiológica ou nuclear. Finalmente, será avaliado o uso de radiocésio como marcador ou rastreador de nutrientes em vegetais.

4.1 Propriedades físico-químicas e concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K no solo

Uma avaliação das propriedades físico-químicas do solo é importante para se compreender como ocorre a absorção de sais minerais pelas raízes das plantas. Trabalhos encontrados na literatura [Bell & Shaw, 2005] apontam que césio e potássio são absorvidos na forma de íons e que a eficiência deste processo está relacionada a parâmetros do solo, tais como o potencial hidrogeniônico (pH), a umidade, a composição granulométrica do solo, o percentual de matéria orgânica etc.

Contando com a colaboração do Instituto de Geologia da Universidade de São, foram realizadas análises granulométricas de amostras do solo dos mamoeiros contaminados por ^{137}Cs (solo 1), da bananeira contaminada (solo2), das mandioqueiras contaminadas (solo 3), do mamoeiro não-contaminado (solo 4), das mandioqueiras não-contaminadas (solo 5). No LARA, foram analisadas as quantidades de íons seletivos de K^+ disponíveis (*potassium exchange*) e os valores de pH desses solos. Amostras de solo da bananeira não-contaminada (solo 6) e das goiabeiras não-contaminadas (solo 7 e 8) foram apenas analisadas no LARA. As amostras provenientes de cada planta foram coletadas na região das raízes, a uma profundidade média de 20 cm, obedecendo a normas internacionais de coleta [Bell & Shaw, 2005; Ciuffo *et al.*, 2002; Mc Gee *et al.*, 2000]. Para cada planta, foram coletadas 10 amostras de solo.

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K e das principais propriedades de cada solo. É possível observar que as concentrações de ^{137}Cs para os solos 1, 2 e 3 possuem desvios médios de 68% a 90%. Esse resultado mostra a heterogeneidade da distribuição de césio no solo onde foram cultivadas as plantas

analisadas nesse trabalho, indicando claramente que um elevado grau de incerteza seria propagado nos cálculos dos fatores de transferência solo-planta (FT). Os desvios médios das concentrações de ^{40}K variaram menos, no máximo 10% em relação aos seus valores médios. As concentrações de K^+ são o que realmente está disponível para ser interceptado pelas raízes das plantas, e as concentrações em Bq.kg^{-1} não fazem distinção entre o potássio livre (K^+) e o que está aprisionada na forma de rocha.

Tabela 4.1: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K , granulometria, pH e K^+ nas amostras de solos onde foram cultivadas as plantas estudadas nesse trabalho.

Amostra	Concentração		Granulometria			pH	K^+ (cmol/kg)
	^{137}Cs (kBq.kg $^{-1}$)	^{40}K (Bq.kg $^{-1}$)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)		
Solo 1	22 ± 15	578 ± 8	39%	47%	14%	6,185	0,10
Solo 2	1,0 ± 0,9	516 ± 8	58%	35%	7%	6,923	1,4
Solo 3	8 ± 6	499 ± 14	46%	43%	11%	6,408	0,34
Solo 4	-	455 ± 13	40%	52%	8%	7,349	0,44
Solo 5	-	1198 ± 78	44%	50%	6%	7,169	0,52
Solo 6	-	586 ± 15	-	-	-	3,994	0,044
Solo 7	-	658 ± 9	-	-	-	5,366	0,24

Os valores de concentração de K^+ ficaram entre 0,044 e 1,4 cmol. kg $^{-1}$. Já para os valores de pH o solo 6 o teve seu valor mais ácido: 3,994. Os outros solos variaram entre 5,4 e 7,3. Nas amostras onde foi realizada a granulometria, a variação do percentual de grão de areias ficou entre 39 e 58%, 35 e 50% para a silte e 6 e 14% para a argila.

4.2 Distribuição de ^{137}Cs e ^{40}K no interior das plantas

A partir dos valores obtidos para as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K em cada compartimento das plantas, é possível avaliar suas taxas de acúmulo e, portanto, o comportamento geral destes elementos no interior de vegetais tropicais. Além disso, é possível observar a ocorrência de correlações entre seus comportamentos.

Na área de radioecologia, em geral, os valores de concentração desses dois radionuclídeos são calculados em unidades de $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ou seja, concentração da atividade. Entretanto, para caráter de comparação entre as quantidades reais desses dois radionuclídeos alguns fatores devem ser levados em consideração.

O potássio é um elemento natural que está presente no solo. Todo esse potássio presente na natureza é composto de três isótopos, sendo um deles radioativo (^{40}K). Por isso existe uma relação isotópica entre esses elementos dada por: 93,2581 % de ^{39}K , 0,0117 % de ^{40}K e 6,7302 % de ^{41}K (isótopo estável).

Já no caso do ^{137}Cs não existe relação isotópica, pois se trata de um isótopo artificial. O ^{137}Cs é produzido através da fissão do núcleo do ^{235}U , que é utilizado como combustível em usinas nucleares ou na composição de bombas atômicas. No caso do presente estudo, ele foi depositado no solo devido ao acidente radiológico de Goiânia (1987).

Para cada um dos casos descritos acima, é possível calcular a fração desses elementos presentes numa amostra, correlacionando esse valor com a sua concentração em unidades $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. A equação 4.1 mostra descreve esse cálculo.

$$F_E = \frac{M_E C}{\lambda_E N_A f_{E,A}} A_E \quad (4.1)$$

onde:

F_E = Fração do elemento E na amostra;

M_E = Massa atômica ($\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$);

C = Constante referente à fração;

λ_E = Constante de decaimento (s^{-1});

N_A = Número de Avogadro ($\text{átomos}\cdot\text{mol}^{-1}$);

$f_{A,E}$ = Abundância do isótopo radioativo na natureza.

A_E = Medida da concentração ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$);

A constante C assume o valor de interesse, relativo ao tipo de fração do elemento na amostra. Para o césio é interessante avaliar seu valor em partes por milhão (ppm), então o valor da constante C é igual a 10^6 . Já para o potássio é interessante avaliar sua quantidade na amostra em porcentagem (%), uma vez que é conhecido na literatura o seu fator de transformação entre $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ e %. Assim, o valor da constante C usada é igual a 10^2 . Utilizando a Equação 4.1, o fator de transformação para o potássio é dado pela relação: 1% (ou 10^4 ppm) de potássio é igual $317 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ de ^{40}K . Para o césio a fração na amostra é dada pela relação: 1 ppm de césio é igual a $3,2 \times 10^9 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ de ^{137}Cs .

É claramente perceptível que a quantidade de césio no solo é muito inferior a de potássio, embora as concentrações desse elemento em $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ nos compartimentos das plantas possua a mesma ordem de grandeza. Assim, o ^{137}Cs pode assumir facilmente o papel de uma substância marcadora ou traçadora dentro de um vegetal.

4.2.1 Distribuição Longitudinal

O comportamento de ^{137}Cs e ^{40}K foi avaliado ao longo de cada espécie de planta estudada neste trabalho. Para tanto, foram analisadas as concentrações destes elementos nos principais órgãos ou compartimentos superiores. Assim, as amostras foram divididas basicamente em raízes ou tubérculos, caule ou tronco principal, cascas (do

caule principal e/ou galhos), galhos adultos e jovens, brotos ou talos, folhas jovens e velhas e frutos.

4.2.1.1 Mandioqueiras

Como já foi dito no Capítulo 2, foram analisadas 4 mandioqueiras cultivadas em solo contaminado de ^{137}Cs (MC1, MC2, MC3 e MC4) e 3 mandioqueiras cultivadas em solo não contaminado pelo acidente de Goiânia (MNC1, MNC2 e MNC3).

A Mandioqueira MD1 foi dividida em 5 compartimentos: folhas jovens, folhas velhas, brotos, galhos, raiz e tubérculo ou parte comestível. Devido ao pequeno diâmetro dos galhos dessa planta (cerca de 1,5 cm), não foi possível separar a casca da parte lenhosa dessa planta. Para as raízes e tubérculos as cascas foram separadas da parte interna e o tubérculo **A** foi dividido em 3 amostras.

A Figura 4.1 mostra um esquema de como era a mandioqueira MC1 e quais são os locais em que as amostras foram extraídas para a análise. A Tabela 4.2 mostra os valores de concentrações para ^{137}Cs e ^{40}K obtidos em cada uma das amostras da mandioqueira MC1. É possível observar que as cascas das raízes e das mandiocas possuem concentrações altas de ^{137}Cs . Entretanto, esse valor pode não corresponder a quantidade real desse radionuclídeo absorvido pelo compartimento. Isso acontece, pois o césio pode penetrar pelo tecido das cascas, sem ser pelo processo de absorção de íons exercido pelas raízes da planta. A mandioca continha uma película entre a casca e sua parte interna (sub-casca). O valor de concentração dessa amostra está na mesma ordem de grandeza das concentrações internas desse compartimento, mostrando que a penetrabilidade do césio ocorre somente no tecido superficial das cascas. Devido ao tamanho inferior das outras mandiocas não foi possível separar as amostras de sub-casca das outras mandiocas (B, C e D).

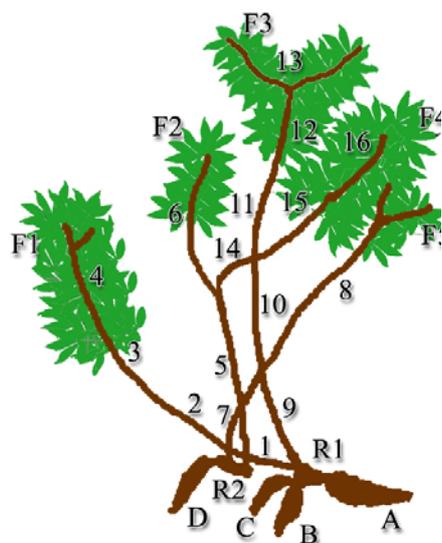


Figura 4.1: Figura esquemática das amostras analisadas da mandioqueira MCI. As letras A, B, C e D representam as mandiocas, R1 e R2 as raízes, F1, F2, F3, F4 e F5 os locais de coleta de folhas e os números de 1 a 16 as amostras de caule.

Tabela 4.2: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mandioqueira MCI. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parentes o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	Valores médios de Concentração			
		N	^{137}Cs (Bq.kg ⁻¹)	N	Média de ^{40}K
Tubérculo	A, B, C e D	6	282 (92)	1	403 \pm 32
	A (Subcasca)	1	358 \pm 38	-	-
	A (Casca)	1	3696 \pm 438	-	-
Raiz	R1, R2 e R3	3	462 (78)	-	-
	R1, R2 e R3 (Casca)	3	2156 (260)	1	395 \pm 32
Galhos	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, e 8	8	196 (28)	2	255 (32)
Brotos	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16	8	780 (146)	3	474 (106)
Folhas	Velhas	1	225 \pm 19	1	210 \pm 18
	Jovens	4	661 (118)		

Os compartimentos galhos e brotos foram separados de acordo com os seus diâmetros. Essa mandioqueira tinha uma anatomia diferenciada. Apesar das raízes estarem uma ligada às outras, essa planta possuía vários caules independentes que saiam do solo, como é possível observar na Figura 4.1. Devido ao pequeno diâmetro dos galhos e brotos analisados, não foi possível separar as cascas desses dois compartimentos.

As amostras de folhas foram separadas em jovens e velhas de acordo com o seu estado visual. Assim como encontrado na literatura para outras árvores lenhosas de clima temperado, as folhas jovens apresentaram concentração maiores de ^{137}Cs em relação as folhas velhas, numa relação de 2 a 4 vezes maiores. Os brotos são caules mais jovens em relação aos galhos e também apresentaram concentrações de ^{137}Cs maiores que os galhos.

Os compartimentos que obtiveram concentrações mais elevadas de ^{137}Cs foram as folhas jovens e os brotos e o compartimento com menores valores de ^{137}Cs foram os galhos.

Para a análise das concentrações de ^{40}K nas amostras estudadas foi necessário modificar a geometria dos potes onde as amostras foram acondicionadas em relação às medidas de ^{137}Cs , uma vez que algumas amostras apresentaram concentrações de ^{40}K abaixo do seu limite de detecção nesta geometria inicial (em média 3,5 gramas por amostra). Para tanto, foram utilizados potes de maior volume para as medidas de ^{40}K (de 15 a 20g por amostra), fazendo com que algumas amostras iniciais fossem reunidas em um único pote cilíndrico.

Os galhos e as folhas apresentaram concentrações menores de ^{40}K . Não foi possível separar as folhas em compartimentos jovens e velhos. Os brotos **foi** o compartimento que obteve maiores concentrações desse radionuclídeo. Esses resultados sugerem uma tendência de comportamento semelhante entre ^{137}Cs e ^{40}K em relação ao acúmulo desses elementos dentro dessa planta.

Os valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K para a mandioqueira MC2 podem ser vistos na Tabela 4.3. A Figura 4.2 mostra um esquema da separação dos compartimentos e das amostras. Essa mandioqueira foi dividida em 7 compartimentos: mandioca, raiz, tronco principal, galhos, brotos, cascas e folhas. Nessa planta, por seus

galhos possuírem um diâmetro maior, foi possível separar as cascas da parte lenhosa. As duas mandiocas originaram uma amostra de parte interna cada (A e B) e outra amostra de casca para cada uma. Foi possível ainda analisar uma amostra de raiz (R) e sua respectiva casca.

Não foi possível separar as folhas em partes velhas e jovens, sendo para essa mandioqueira um único compartimento de folha com 3 amostras. Diferente da MC1 foi possível identificar o caule principal da MC2 e esse foi separado como um único compartimento. Os outros caules secundários foram então separados em: galhos, e brotos.

As amostras de casca das mandiocas e da raiz também apresentaram valores mais elevados de concentração de ^{137}Cs . De novo, esse valor pode estar relacionado com a propriedade de impregnação do céσιο. Não houve uma separação entre a mandioca e a película que fica entre a parte interna e a casca. Entre os compartimentos lenhosos os brotos novamente apresentaram valores mais elevados de ^{137}Cs e o tronco principal os menores valores. Num comparativo entre todos os compartimentos dessa planta esses foram os compartimentos que obtiveram os maiores e menores valores de ^{137}Cs , respectivamente.

Nessa mandioqueira, para a análise de ^{40}K , a planta foi dividida em 5 compartimentos. Não foi possível acumular massa suficiente para a análise de ^{40}K nas cascas. O compartimento que apresentou o menor valor de concentração de ^{40}K foi o caule principal e os maiores valores ficaram nas raízes e mandiocas. Essa mandioqueira não parece ter a mesma preferência para o acúmulo de ^{137}Cs e ^{40}K , mostrando um comportamento diferente a mandioqueira MC1.

Tabela 4.3: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mandioca MC2. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parentes o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	Valores médios de Concentração			
		N	^{137}Cs (Bq.kg $^{-1}$)	N	Média de ^{40}K
Tubérculo	A	2	439 (64)	1	440 \pm 60
	B	2	818 (8)	-	-
Raiz	R	1	442 \pm 39	1	442 \pm 68
	R – Casca	1	1498 \pm 111	-	-
Caule Principal	1, 2, 3, 4 e 5	5	260 (21)	1	254 \pm 26
Galhos	6, 7, 8, 9, e 10	5	358 (55)	1	338 \pm 47
Brotos	11, 12, 13, 14 e 15	5	356 (71)		
Cascas	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14	14	630 (74)	-	-
Folhas	F1, F2, F3 e F4	4	367 (45)	1	367 \pm 52

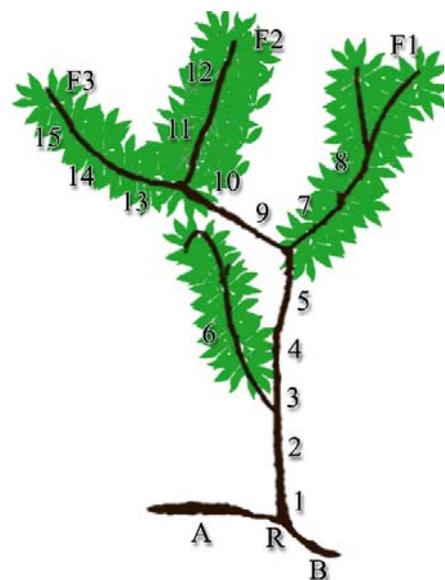


Figura 4.2: Figura esquemática das amostras analisadas da mandioca MC2. As letras A e B representam as mandiocas, R representa a raiz, F1, F2 e F3 são os locais de coleta de folhas e os números de 1 a 15 as amostras de caule.

Na Figura 4.3 e na Tabela 4.4 pode ser visto a representação esquemática da mandioca MC3 e os seus valores de concentrações nas amostras analisadas para ^{137}Cs e ^{40}K , respectivamente. Essa mandioca foi dividida em 6 compartimentos: mandioca, raiz, tronco principal, brotos, cascas e folhas. A anatomia dessa planta é diferente das outras duas anteriores e por isso não foi possível identificar o compartimento galho, pois ao final do caule principal havia prolongamentos com o mesmo diâmetro dos brotos.

As cascas das mandiocas e das raízes não aparentaram valores muito elevados de ^{137}Cs como aconteceu com as duas mandioceras anteriores. Isto é devido ao fato da

concentração de ^{137}Cs no solo ser menor que para as outras plantas. O compartimento de maior concentração de ^{137}Cs para essa mandiogueira foram os brotos. Os demais compartimentos apresentaram concentrações desse elemento praticamente iguais, dentro da barra de erro. Entretanto o tronco principal tem uma tendência também nessa planta de apresentar o menor valor de ^{137}Cs , assim como as mandiocas, que apresentaram valores mais baixos nessa planta.

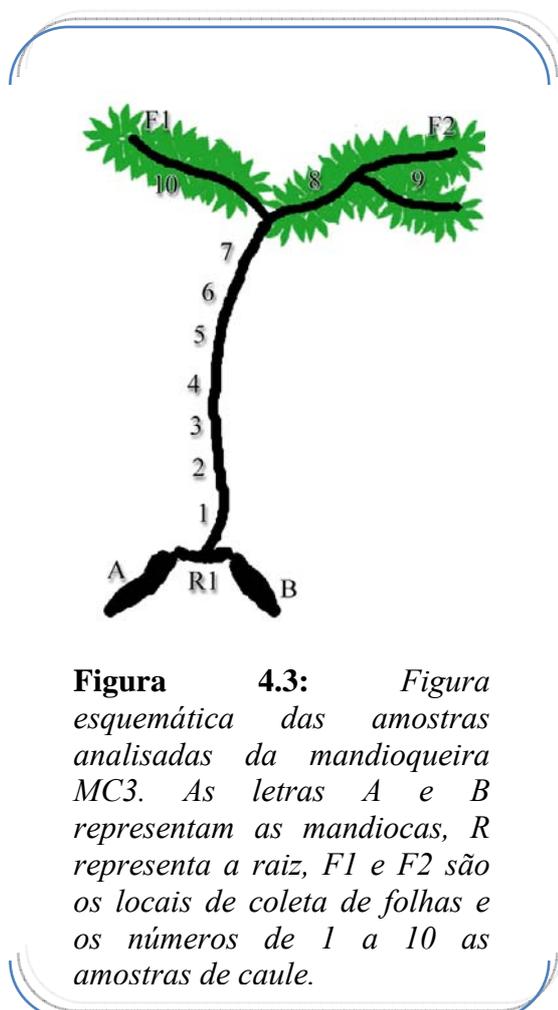


Tabela 4.4: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mandiogueira MC3. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	Valores médios de Concentração			
		N	^{137}Cs (Bq.kg^{-1})	N	^{40}K (Bq.kg^{-1})
Tubérculo	A e B	2	51 (12)	2	590 (204)
	A e B (Casca)	2	264 (134)	-	
Raiz	R	1	96 ± 19		
	R (Casca)	1	366 ± 37	1	356 ± 28
Caule Principal	1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	7	80 (10)	1	401 ± 34
Brotos	8, 9 e 10	3	270 (70)	1	471 ± 41
Cascas	1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	3	180 (24)	-	-
Folhas	F1 e F2	2	144 (6)	1	420 ± 37

Para a análise de ^{40}K a mandiogueira foi dividida em 5 compartimentos: mandioca, raiz, tronco principal, brotos e folhas. O compartimento que apresentou o menor valor de concentração de ^{40}K foi a raiz e em seguida o tronco principal. Os

valores de potássio apresentaram pouca variabilidade nessa mandiogueira. Os maiores valores de concentração ficaram no compartimento das mandiocas, semelhante ao que aconteceu nas mandiogueiras anteriores.

A mandiogueira MC4 foi dividida em 7 compartimentos: mandiocas, raízes, tronco principal, galhos, brotos, cascas, e folhas. A Figura 4.4 mostra um esquema sobre a divisão das amostras dessa planta. Essa mandiogueira tem uma anatomia parecida com a mandiogueira MC3 e, como pode ser visto na Tabela 4.5, um comportamento semelhante em relação ao acúmulo de ^{137}Cs e ^{40}K nos compartimentos.

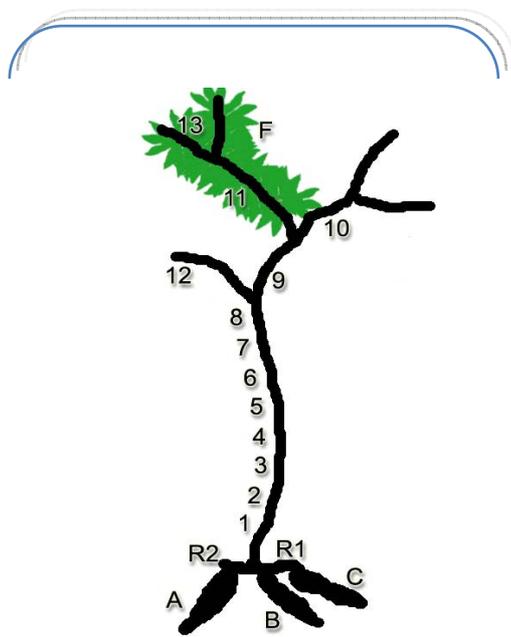


Figura 4.4: Figura esquemática das amostras analisadas da mandiogueira MC4. As letras A, B e C representam as mandiocas, R1 e R2 representam as raízes, F é o local de coleta de folhas e os números de 1 a 13 as amostras de caule.

Tabela 4.5: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mandiogueira MC4. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	Valores médios de concentração			
		N	Média de ^{137}Cs	N	Média de ^{40}K
Tubérculo	A, B e C	3	78 (12)	2	565 (203)
	A, B e C (Casca)	3	169 (17)	-	-
Raiz	R1 e R2	2	79 (10)	1	366 ± 29
	R1 e R2 (Casca)	1	192 ± 21	-	-
Caule Principal	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8	8	119 (40)	1	522 ± 44
Galhos	9, 10 e 11	3	153 (26)	1	601 ± 54
Brotos	12 e 13	2	457 (141)		
Casca	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8	3	175 (107)	-	-
Folhas	F	1	369 ± 44	1	414 ± 36

As mandiocas apresentaram os menores valores de ^{137}Cs seguidas das raízes e do tronco principal. Não foi possível analisar amostras das cascas desses tubérculos. O compartimento de maior acúmulo desse elemento nessa planta foram os brotos, assim como na MC3.

Para os valores de ^{40}K , a MC4 apresentou também pouca variação. O compartimento de maior concentração foram os brotos seguidos pelas mandiocas e o tronco principal. Diferentemente para essa mandioca, as folhas apresentaram valores menores de ^{40}K do que o tronco principal.

De um modo geral, as mandioqueiras contaminadas (MC1, MC2, MC3 e MC4) apresentaram alta variação entre os valores de concentração médio dos seus compartimentos. Esse comportamento demonstra que elas poderiam estar sobre aspectos externos diferentes uma das outras.

Apesar de terem sido coletadas no mesmo período, as plantas possuíam anatomias diferenciadas e por isso poderiam estar em fases de crescimento diferente. Outro fator que poderia explicar essa alta variação no comportamento desses vegetais é a composição do solo e a quantidade de nutrientes disponíveis para essas mandioqueiras. Esse assunto será discutido na secção 4.3.

A Tabela 4.6 e a Figura 4.5 mostram os valores de concentração de ^{40}K e a estrutura esquemática da mandioqueira não contaminada MNC1. Essa mandioqueira foi dividida em 7 compartimentos: mandioca, raiz, caule principal, galhos, brotos, cascas e folhas jovens. Não foi possível analisar amostras de folhas velhas devido a pequena quantidade de amostra.

A Tabela 4.6 mostra que o compartimento que teve maior acúmulo de ^{40}K nessa planta foi a mandioca, entretanto com um desvio da média muito elevado, por possuir 2 mandiocas com valores de concentrações muito diferentes. Os brotos, cascas e folhas

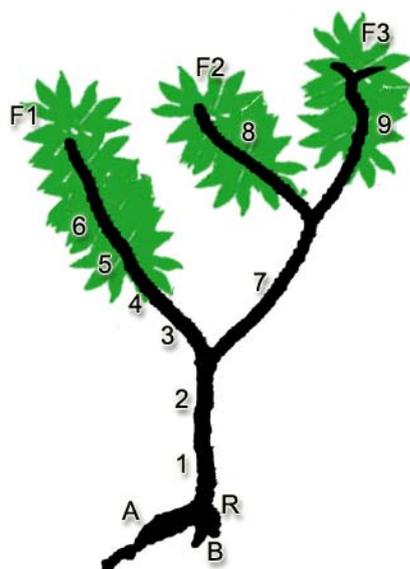


Figura 4.5: Figura esquemática das amostras analisadas da mandioca MNC1. As letras A e B representam as mandiocas, R representa a raiz, F1, F2 e F3 são os locais de coleta de folhas e os números de 1 a 9 as amostras de caule.

Tabela 4.6: Valores de concentração de ^{40}K na mandioca MNC1. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	N	Valores médios de concentração ^{40}K ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Tubérculo	A e B	2	475 (72)
	A e B (Cacas)	2	1217 (71)
Raízes	R	1	349 ± 35
Caule Principal	1 e 2	2	445 (40)
Galhos Velhos	3, 4, 5, 6 e 7	5	411 (61)
Galhos Jovens	8 e 9	2	621 (138)
Casca	1 e 2	2	653 (4)
Folhas Jovens	F1, F2 e F3	3	634 (133)

jovens são os compartimentos de maior concentração seguidos das mandiocas. Esses 3 compartimentos apresentaram valores iguais ^{40}K (dentro do desvio da média). A raiz apresentou o menor valor de concentração seguido dos galhos e o caule principal.

Na Tabela 4.7 é possível ver os valores de concentração de ^{40}K para a mandioca não contaminada MNC2. Essa mandioca foi dividida em 7 compartimentos: mandiocas, raiz, tronco principal, galhos, brotos, cascas e folhas velhas. Um esquema da mandioca MNC2 pode ser visto na Figura 4.6. Diferente do que aconteceu na mandioca MNC1, essa planta não teve quantidade de massa suficiente para produzir uma amostra de folhas jovens.

Para a MNC2 o compartimento que apresentou o maior valor de concentração para ^{40}K foram os brotos, seguidos pelas cascas e pelas mandiocas. O compartimento de menor valor de concentração foi a raiz e, em seguida, as folhas velhas. Semelhante ao que aconteceu nas mandioqueira contaminadas MC3, MC4 e MNC1 a mandioqueira não contaminada MNC2 também apresentou a raiz como compartimento de menor concentração.

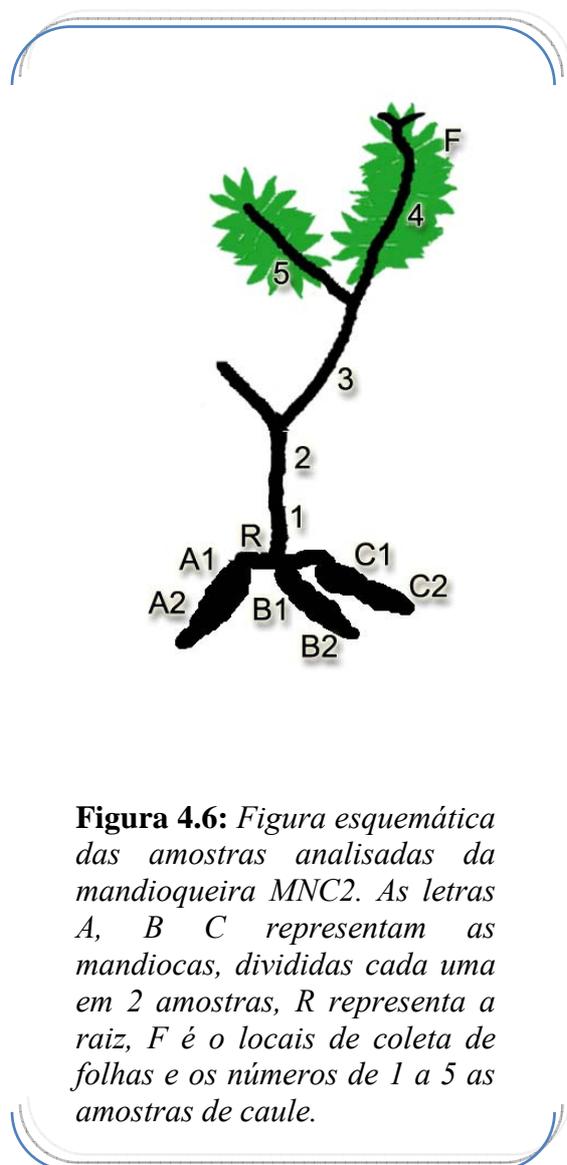


Tabela 4.7: Valores de concentração de ^{40}K na mandioqueira MNC2. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	N	Valores médios de concentração ^{40}K ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Tubérculo	A, B, C, D, E e F	6	353 (53)
	A, B, C, D, E e F (Cascas)	5	509 (91)
Raízes	R	1	193 \pm 17
	R (Casca)	1	409 \pm 43
Caule Principal	1 e 2	2	219 (55)
Galhos	3	1	279 \pm 28
Galhos Jovens	4 e 5	2	463 (12)
Casca	1, 2 e 3	2	348 (1)
Folhas Velhas	F	1	223 \pm 21

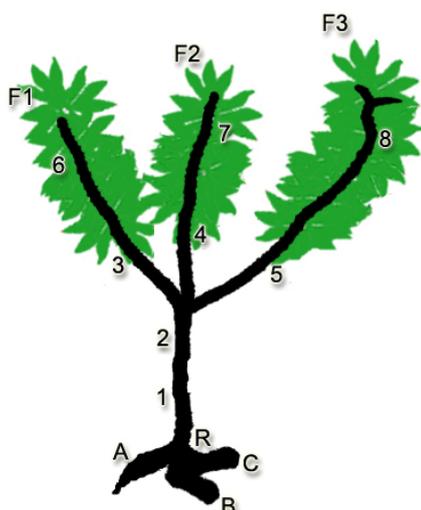


Figura 4.7: Figura esquemática das amostras analisadas da mandioqueira MNC3. As letras A, B e C representam as mandiocas, divididas cada uma em 2 amostras, R representa a raiz, F1, F2 e F3 são os locais de coleta de folhas e os números de 1 a 8 as amostras de caule.

Tabela 4.8: Valores de concentração de ^{40}K na mandioqueira MNC3. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média.

Compartimento	Legenda	N	Valores médios de concentração ^{40}K ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Tubérculo	A, B e C	3	704 (34)
	A, B e C (Casca)	3	796 (49)
Raízes	R1 e R2	2	1000 (99)
	R1 e R2 (Casca)	1	578 ± 57
Caule Principal	1 e 2	2	958 (32)
Galhos	3, 4 e 5	3	794 (54)
Brotos	6, 7 e 8	1	1250 ± 142
Casca	1 e 2	1	2099 ± 91
Folhas Jovens	F1, F2 e F3	1	1508 ± 86
Folhas Velhas	F1, F2 e F3	3	1054 (7)

A última mandioqueira analisada foi a mandioqueira não contaminada MNC3. Essa mandioqueira foi dividida em 8 compartimentos: mandiocas, raízes, tronco principal, galhos, brotos, cascas, folhas velhas e folhas jovens. A Tabela 4.8 e a Figura 4.7 mostram os valores de concentração de ^{40}K para esses compartimentos e um esquema dos locais de coleta de amostras, respectivamente.

O compartimento que apresentou o maior valor de concentração para essa mandioqueira foi a casca, seguido das folhas jovens. E os compartimentos de menores valores de ^{40}K foram os galhos e as mandiocas, seguido do tronco principal e raízes. As folhas velhas também possuem valores médios de concentração semelhantes as raízes e

ao tronco principal (dentro da barra de erro) entretanto com uma tendência de valores maiores a esses compartimentos.

De uma maneira geral, as mandioqueiras contaminadas (MC1, MC2, MC3 e MC4) apresentaram valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K bastante variados. Um dos motivos seria devido a anatomia bastante variada de cada um desses vegetais. Contudo, é possível notar que há um maior acúmulo de césio e potássio nas partes mais jovens (brotos, folhas e galhos) quando comparadas com as partes mais velhas (caule principal). Com o objetivo de obtermos um comportamento médio destes elementos nesta espécie planta, no item 4.2.1, será apresentando um cálculo de proporcionalidade entre os compartimentos jovens e velhos da planta.

4.2.1.2 Bananeiras

Foram analisadas 2 bananeiras para esse trabalho. Uma contaminada com ^{137}Cs (BC) e outra sem a presença desse radioisótopo (BNC).

A Tabela 4.9 mostra os valores de concentração para cada amostra analisada da bananeira contaminada BC, referente a cada compartimento dessa planta. Essa bananeira foi dividida em 6 compartimentos: caule (pseudocaule) interno e externo, talos, folhas, polpa e cascas dos frutos. Os frutos dessa bananeira estavam todos maduros. A Figura 4.8 mostra uma representação esquemática de como era a bananeira BC.

Para essa planta o compartimento que apresentou o maior valor de concentração de ^{137}Cs foi o pseudocaule interno, seguido das cascas das bananas e dos talos das folhas. O compartimento de menor concentração foi a polpa da banana, seguido das folhas. Para a bananeira BC os valores de concentração de ^{40}K seguiram a mesma tendência de acúmulo do que o ^{137}Cs .

A bananeira não contaminada BNC foi dividida em 8 compartimentos: caule (pseudocaule) interno e externo, talos das folhas, folhas, cascas e flores do coração, talos dos frutos e frutos. A Figura 4.9 mostra um esquema da localização de cada amostra analisada. Essa bananeira possuía um cacho de bananas maior do que o da bananeira contaminada, entretanto seus frutos estavam verdes.

Na Tabela 4.10 é possível ver os valores de concentração de ^{40}K para a bananeira BNC. Seguindo um comportamento semelhante ao da bananeira contaminada BC, essa bananeira teve a parte interna do pseudocaule como sendo o compartimento de maior concentração de ^{40}K e as folhas e frutos foram os compartimentos de menor concentração. As cascas do coração foi o segundo compartimento de maior concentração. As flores do coração apresentaram uma grande variação nas concentrações de ^{40}K , tendo valores altíssimos para as flores mais externas, maior até que a parte interna do pseudocaule, variando até uma concentração abaixo dos frutos e

Tabela 4.9: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na bananeira BC. Os valores entre parenteses representam o desvio da média e a coluna N o número de amostras analisadas

Compartimento		Legenda	N	Valores médios de concentração	
				^{137}Cs (Bq.kg ⁻¹)	^{40}K (Bq.kg ⁻¹)
Caule Principal	Interno	A1, A2, B1 e B2	4	24 (2)	1321 (64)
	Externo	A B	23 24	40 (11) 24 (5)	1587 (361) 957 (124)
Talos		F1, F2 e F3	5	17 (2)	755 (164)
Folhas		F1, F2 e F3	6	12 (1)	641 (110)
Futos	Polpa	P1, P2, P3, P4, P5 e P6	3	7,4 (0,5)	481 (7)
	Cascas	P1, P2, P3, P4, P5 e P6	6	20 (3)	1176 (93)

folhas. Os talos das folhas e dos frutos apresentaram concentrações médias praticamente iguais, semelhante ao que aconteceu com as folhas e os frutos.

Diferentemente das mandiocueiras, não houve um favorecimento no acúmulo de céσιο ou potássio nas partes jovens das bananeiras. A parte interna do pseudo-caule apresentou maiores concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K que as partes de crescimento, como folhas, talos e frutos. Com isso, foi possível observar que embora o céσιο e o potássio tenham apresentado distribuições semelhantes nas plantas, sua taxa de acúmulo em um dado compartimento apresenta uma grande dependência da espécie da planta.

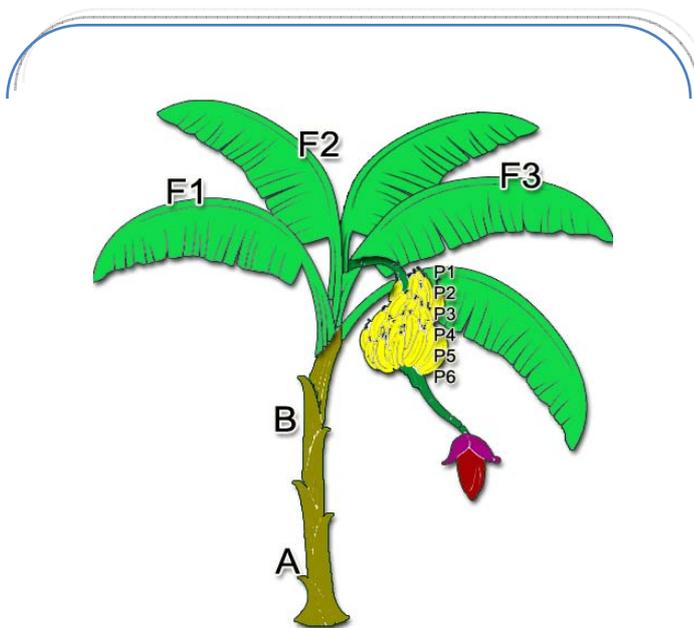


Figura 4.8: Figura esquemática das amostras analisadas da bananeira BC. As letras A e B são as amostras dos discos analisados, divididas cada uma em 2 compartimentos (interno e externo), P1 até P6 representam pencas de bananas analisadas e F1 F2 e F3 são os locais de coleta de folhas.

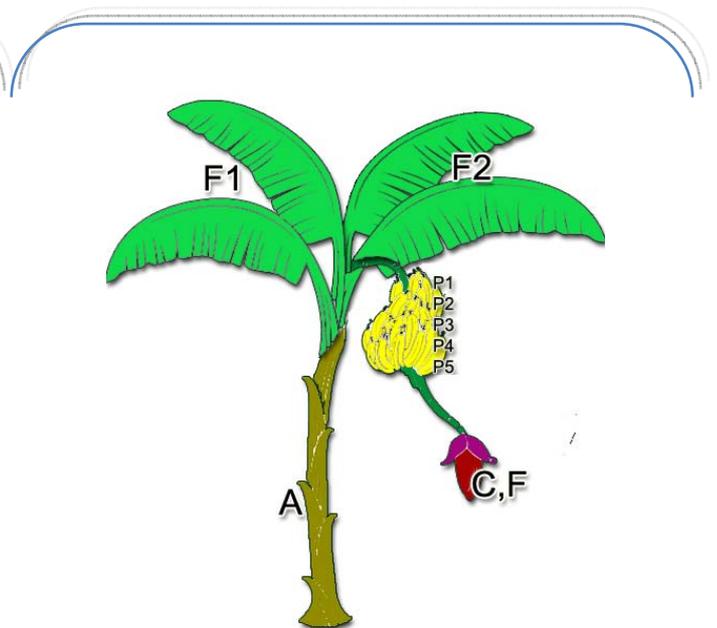


Figura 4.9: Figura esquemática das amostras analisadas da bananeira BNC. A letra A é o disco analisado, divididas em 2 compartimentos (interno e externo), P1 até P5 representam pencas de bananas analisadas, F1 e F2 são os locais de coleta de folhas e C,F é o local de coleta das amostras do coração.

Tabela 4.10: Valores de concentração de ^{40}K na bananeira não contaminada BNC. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média. A coluna N o número de amostras analisadas

Compartimento		Legenda	N	Valores médios de concentração ^{40}K (Bq.kg^{-1})
Caule Principal	Interno	A1 e A2	2	2329 (115)
	Externo	A	22	1421 (176)
Talos		F1 e F2	3	1410 (96)
Folhas		F1 e F2	2	1243 (85)
“Coração”	Casca	Externo	1	1944 ± 104
		Interno	1	1746 ± 78
	Flores	Externo	1	2762 ± 55
		Meio	1	972 ± 73
Interno	1	1251 ± 38		
Talo dos frutos		P1, P2, P3, P4 e P5	3	1410 (96)
Frutos		P1, P2, P3, P4 e P5	5	1203 (52)

A banana é um alimento popularmente conhecido como rico em potássio. Um fato interessante a ser observado é que as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K na polpa da banana são cerca de 3 vezes menores do que nas cascas, sendo a polpa o compartimento de menor acúmulo desses elementos. Um vez que se busque nas bananas uma fonte de potássio seria interessante a utilização das cascas como fonte desse nutriente.

4.2.1.3 Mamoeiros

Foram analisados para esse trabalho três mamoeiros do tipo papaia, também conhecidos popularmente como papaieiras. Duas dessas plantas foram cultivadas em

solo com a presença de ^{137}Cs (PC1 e PC2) e a outra em solo sem a presença desse radionuclídeo (PNC).

A papaieira contaminada PC1 foi dividida em 9 compartimentos: tronco principal interno e externo, haste, talos das folhas, folhas e sementes, casca e polpa dos frutos. A Figura 4.10 mostra um esquema dos locais de coleta das amostras analisadas para essa planta e a Tabela 4.11 mostra os valores de concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K em todas essas amostras.

Na Tabela 4.11 pode ser observado que para a papaieira PC1 o compartimento de maior acúmulo de ^{137}Cs é a raiz, seguido de perto pela parte interna do tronco

Tabela 4.11: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na papaieira contaminada PC1. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média. A coluna N o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	N	Valores médios de concentração		
			^{137}Cs (Bq.kg ⁻¹)	^{40}K (Bq.kg ⁻¹)	
Raiz Principal	R1 e R2	2	990 (87)	1734 (447)	
caule Principal	Interno	A	4	892 (101)	2431 (73)
		B	4	682 (71)	1801 (109)
		C	4	578 (48)	1407 (176)
	Externo	A	8	285 (47)	708 (49)
		B	8	264 (29)	691 (72)
		C	4	282 (59)	638 (89)
Talos	H	1	519 \pm 17	2055 \pm 72	
Folhas	F1 e F2	2	395 (74)	1244 (25)	
Frutos	Cascas	M1, M2 e M3	3	482 (86)	1594 (284)
	Polpa	M1, M2 e M3	3	485 (9)	1514 (35)
	Sementes	M1, M2 e M3	3	353 (35)	885 (75)

principal. Para as concentrações de ^{40}K o compartimento de maior concentração foram os talos, seguidos da haste, da parte interna do tronco principal e da raiz. As sementes dos frutos e as folhas apresentaram os menores valores de concentração, tanto de ^{137}Cs quanto de ^{40}K , para essa planta. Em seguida vem a polpa e as cascas dos frutos que não apresentam diferença no acúmulo desses radionuclídeos.

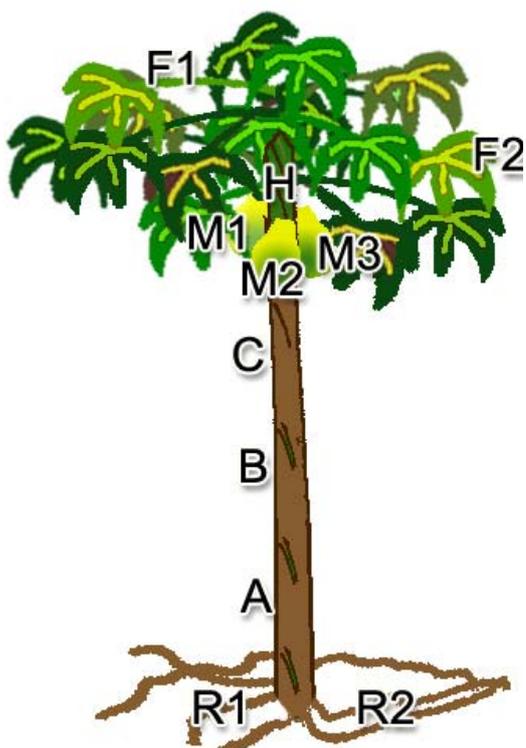


Figura 4.10: Figura esquemática das amostras analisadas da papaieira PC1. R1 e R2 são as amostras de raízes, as letras A, B e C são as amostras dos discos analisados, divididas cada uma em 2 compartimentos (interno e externo), M1, M2 e M3 representam as amostras de mamão analisadas divididas em cascas, polpa e caroço, H representa a haste de sustentação das folhas e F1 e F2 são os locais de coleta de folhas.

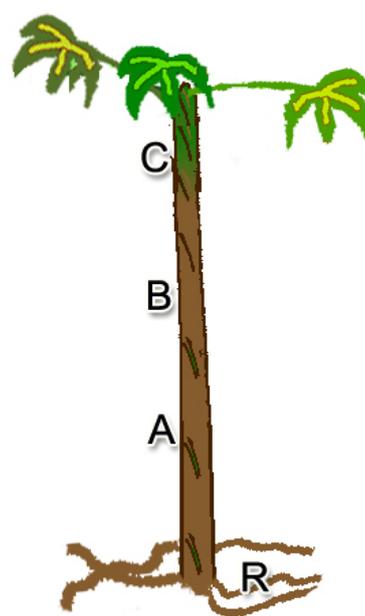


Figura 4.11: Figura esquemática das amostras analisadas da papaieira PC2. R representa as amostras de raízes e as letras A, B e C são as amostras dos discos analisados, divididas cada uma em 2 compartimentos (interno e externo).

Tabela 4.12: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na papaieira contaminada PC2. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média. A coluna N o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	N	Valores médios de concentração		
			^{137}Cs (Bq.kg $^{-1}$)	^{40}K (Bq.kg $^{-1}$)	
Raiz Principal	R	1	2243 \pm 69	1178 \pm 59	
Tronco Principal	Interno	A	4	1119 (76)	1360 (169)
		B	4	788 (54)	1247 (254)
		C	4	333 (53)	954 (102)
	Externo	A	8	606 (65)	800 (124)
		B	8	304 (47)	596 (166)
		C	4	173 (20)	531 (37)

As amostras de caule principal foram divididas em 3 discos e separadas em partes interna e externa. Pode-se observar que para a papaieira PC1 existe um decréscimo entre os valores médios de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K , na parte interna do tronco principal, a medida que o disco se torna mais elevado no tronco. Esse mesmo comportamento foi observado para a bananeira BC que apresentou em média concentrações maiores de ^{137}Cs e ^{40}K no disco A que está mais abaixo que o disco B.

Na Tabela 4.12 podem ser visto que os valores de concentração para o mamoeiro contaminado PC2. Esse mamoeiro só pode ser dividido em 3 compartimentos devido ao seu pequeno porte: raiz e parte interna e externa do tronco principal. Um esquema dos locais de coleta de amostras dessa papaieira pode ser visto na Figura 4.11.

O tronco principal dessa papaieira também foi dividido em 3 discos e o mesmo comportamento em relação ao aumento das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K em relação a altura do disco também foi observado. Adicionalmente, para essa papaieira esse aumento fica evidente tanto na parte interna quanto na parte externa do caule.

A raiz dessa planta teve valor de concentração de ^{40}K compatível com os valores da parte interna do tronco principal, Entretanto o valor de ^{137}Cs , nesse compartimento, ficou muito maior que os valores médios de concentração desse radionuclídeo na parte interna da papaieira PC2, podendo este, estar relacionado à impregnação do ^{137}Cs nas cascas da raiz.

A papaieira não contaminada PNC era a maior entre as três papaieiras analisadas e por isso, a que resultou em um maior número de amostras. Essa planta foi dividida em 6 compartimentos: parte interna e externa do tronco principal, talos das folhas, folhas e cascas e polpa dos frutos. Assim, como foi dito no capítulo 2, o tronco principal foi dividido em 10 discos, cada disco resultando em 24 amostras. Na Tabela 4.13 são apresentados os valores médios de concentração de ^{40}K nos compartimentos analisados da papaieira não contaminada PNC. A copa de folhas resultou em um número grande de amostras podendo ser divididos em 5 partes de acordo com a altura. A Figura 4.12 mostra um esquema dessa planta onde essas questões podem ser observadas.

Essa papaieira teve um comportamento semelhante às outras papaieiras analisadas. A parte interna do tronco principal foi o compartimento de maior acúmulo de ^{40}K seguido das folhas e frutos. As folhas e as cascas, polpas e sementes dos frutos tiveram concentrações praticamente constantes (dentro do desvio da média) de ^{40}K . Por fim, o talo das folhas foi o compartimento de menor concentração.

O comportamento observado no tronco principal das papaieiras contaminadas (PC1 e PC2), de decréscimo de concentração (tanto de ^{137}Cs quanto de ^{40}K) a medida que a altura do tronco vai aumentando não foi verificada para as concentrações de ^{40}K na papaieira não contaminada PNC.

Um comportamento interessante foi observado em relação as concentrações de ^{40}K nos talos e folhas em função da altura da copa de folhas. A Figura 4.13 mostra um

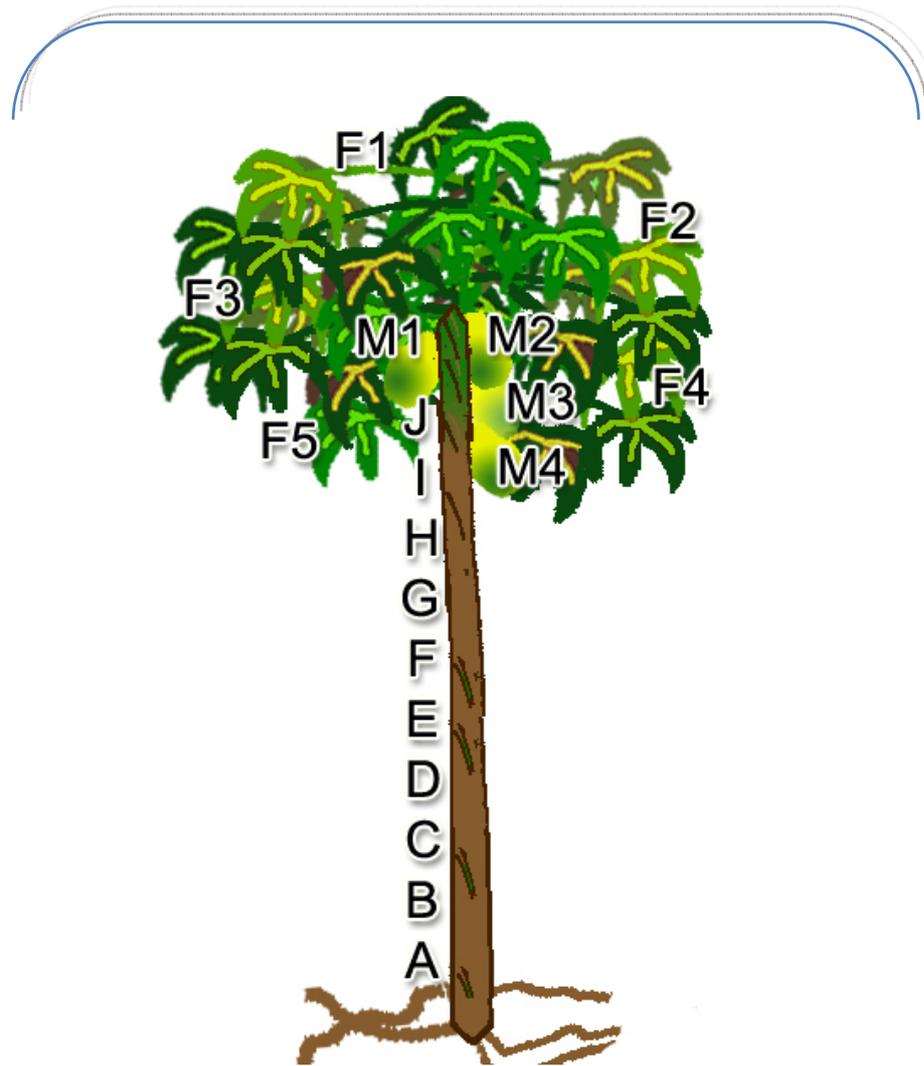


Figura 4.12: *Figura esquemática das amostras analisadas da papaieira PNC: As letras de A até J são as amostras dos discos analisados, divididas cada uma em 2*

gráfico das concentrações de ^{40}K , nas folhas e nos talos, em função dos locais de coleta das respectivas amostras. A altura de cada local de coleta decresce de F1 até F5 e por sua vez a idade das folhas vai aumentando nessa mesma ordem. Ou seja, em F1 é onde as folhas brotam e tem um tamanho menor (motivo pelo qual não foi possível obter massa suficiente para uma amostra de talos), até F5 onde as folhas e os talos são os

Tabela 4.13: Valores de concentração de ^{40}K na papaieira não contaminada PNC. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parentes o desvio da média. A coluna N o número de amostras analisadas.

Compartimento		Legenda	N	Valores médios de concentração ^{40}K (Bq.kg $^{-1}$)
Caule Principal	Interno	A	12	2412 (405)
		B	12	2352 (588)
		C	12	2706 (427)
		D	12	2698 (220)
		E	12	1436 (310)
		F	12	2895 (98)
		G	12	2523 (200)
		H	12	2421 (182)
		I	12	2421 (254)
		J	12	2146 (226)
	Externo	A	12	1892 (145)
		B	12	1990 (218)
		C	12	1505 (434)
		D	12	658 (137)
		E	12	488 (180)
		F	12	950 (56)
		G	12	2033 (159)
		H	12	1053 (115)
		I	12	1362 (85)
		J	12	1199 (127)
Talos		F2	4	1385 (146)
		F3	3	1028 (43)
		F4	4	944 (51)
		F5	5	579 (54)
Folhas		F1	3	972 (50)
		F2	8	1090 (92)
		F3	13	1190 (95)
		F4	6	1299 (190)
		F5	6	1404 (120)
Frutos	Cascas	M1, M2 e M3	3	1242 (142)
	Polpa	M1, M2 e M3	4	1287 (25)
	Sementes	M1, M2 e M3	1	1286 \pm 161

maiores entre todos. As folhas da região F5 são as mais velhas entre todas, mas não estavam secas e nem amareladas, somente com uma coloração verde mais escura que as mais recentes.

O que o gráfico da Figura 4.13 mostra é que enquanto existe um decréscimo nos valores de concentração de ^{40}K nos talos as concentrações desse elemento nas folhas aumentam em função da sua idade. A inversão nas concentrações de potássio nesses compartimentos pode estar relacionada com a dinâmica de transporte desse elemento no envelhecimento das folhas.

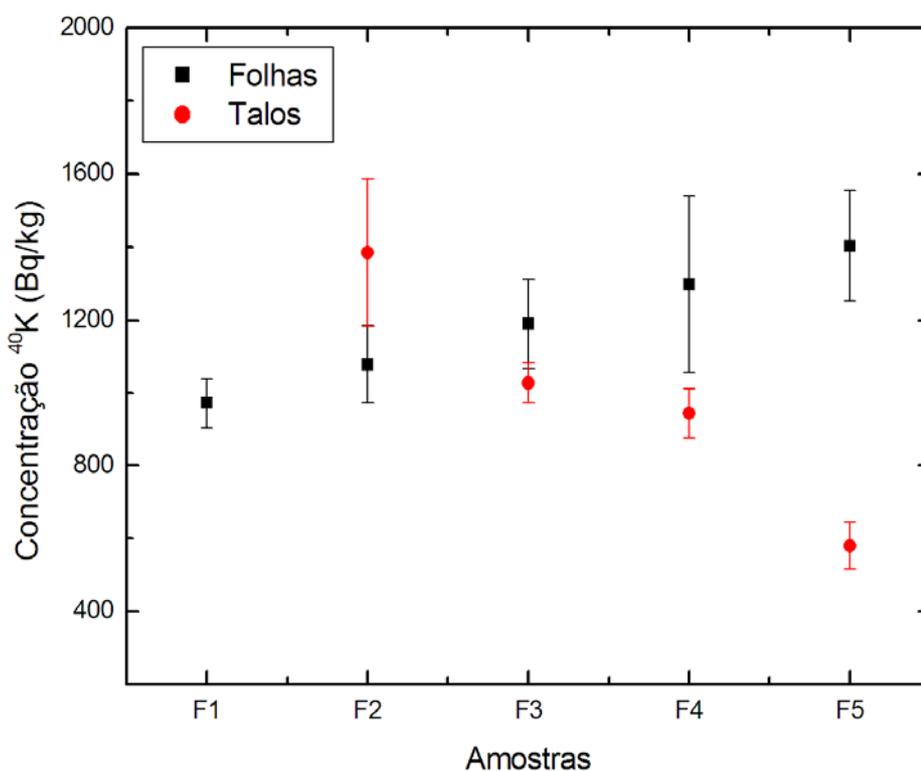


Figura 4.13: Gráfico das concentrações de ^{40}K nas folhas e nos talos da papaieira PCN em função dos locais de coleta de amostra de folhas. A distribuição de F1 até F5 pode ser visto na Figura 4.12. Os pontos vermelhos são referentes as amostras de talos e os quadrados pretos são referentes as amostras de folhas.

De uma maneira geral, as papaieiras (PC1, PC2 e PNC) tiveram comportamentos semelhantes em relação ao acúmulo de ^{40}K e ^{137}Cs , tendo uma distribuição desses

radionuclídeos no interior das plantas semelhante ao das bananeiras (BC e BNC), onde o compartimento de maior acúmulo foi sempre a parte interna do caule principal, e as partes aéreas os menores valores.

4.2.1.4 Goiabeiras

Foram analisadas três goiabeiras para esse trabalho de dissertação de mestrado. Uma delas cultivada na presença de ^{137}Cs e outras duas sem esse elemento no solo.

Para a goiabeira contaminada GC foi retirado um dos seus galhos para ser analisado. Outros trabalhos realizados pelo grupo (Anjos et al. 2008) comprovaram que as amostras de galhos (com diâmetros próximo ao do tronco principal) possuem praticamente os mesmos valores de ^{137}Cs e ^{40}K no seu interior e em suas cascas, desta forma foi possível analisar todos os compartimentos de interesse dessa árvore sem ter que matá-la. Esse galho ficava a um metro do solo e era o primeiro galho que se ramificava do tronco principal.

Com isso, foi possível dividir a goiabeira GC em 8 compartimentos: tronco principal, cascas, galhos, talos velhos, brotos, folhas velhas, folhas jovens, e frutos jovens. A Figura 4.14 mostra um esquema dos locais de coleta das amostras da goiabeira GC.

Na Tabela 4.14 pode-se ver os valores de concentração média de ^{137}Cs e ^{40}K para essa árvore. Os compartimentos de menores valores de concentração para o ^{137}Cs na goiabeira GC foram: o tronco principal, os galhos e o talos velhos, com concentrações praticamente iguais, seguidos dos talos jovens e folhas velhas. O compartimento que

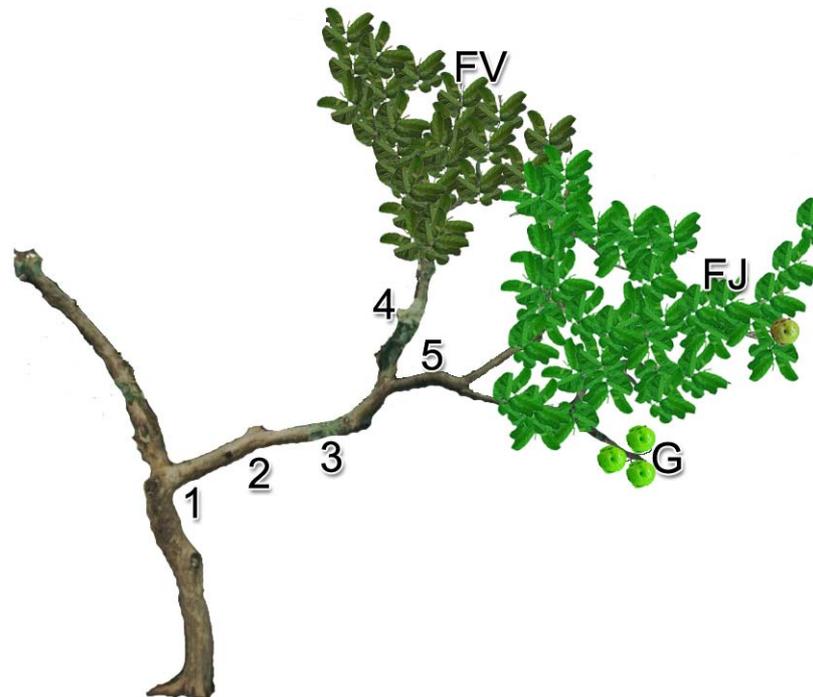


Figura 4.14: *Figura esquemática das amostras analisadas na goiabeira GC: Os números de 1 a 5 são as amostras do caule, G representa o local de coleta da amostra de frutos e FV e FJ são os locais de coleta de brotos e folhas.*

apresentou o maior valor de concentração foi o das folhas jovens, seguido dos frutos jovens. Um comportamento semelhante foi observado para os valores de ^{40}K nessa goiabeira.

A Figura 4.15 mostra um esquema dos locais de coleta de amostras da goiabeira não contaminada GNC1. Para essa goiabeira o mesmo procedimento foi adotado em relação a coleta das amostras. Um galho representativo de diâmetro compatível com o do tronco principal foi cortado e originou as amostras analisadas. A goiabeira GNC1 foi dividida em 9 compartimentos: raiz, tronco principal, cascas, galhos, brotos, folhas

velhas, folhas jovens, frutos maduros e frutos verdes. A Tabela 4.15 mostra os valores de concentração de ^{40}K para as amostras analisadas.

Tabela 4.14: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na goiabeira contaminada GC. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	N	Valores médios de concentração	
			^{137}Cs (Bq.kg $^{-1}$)	^{40}K (Bq.kg $^{-1}$)
Tronco Principal	1, 2 e 3	3	42 (2)	178 (25)
Galhos	4 e 5	2	40 (2)	180 (13)
Cascas	1, 2 e 3	2	124 (4)	411(22)
Brotos	FJ	1	115 \pm 4	399 \pm 25
Folhas Velhas	FV	3	113(3)	664(7)
Folhas Jovens	FJ	3	223(13)	849(74)
Frutos Jovens	G	2	198(4)	765(9)

A goiabeira não contaminada GNC1 teve um comportamento em relação as concentrações de ^{40}K semelhante ao goiabeira GC. O compartimento que teve menor valor de concentração foi o tronco principal e as raízes, seguidos dos galhos, brotos e folhas velhas. O compartimento de maior concentração foi o dos frutos jovens, seguido das cascas, frutos maduros e folhas jovens.

Tronco Principal	1 e 2	2	406 (42)
Galhos	3	3	377 ± 32
Cascas	1, 2 e 3	1	1023 ± 74
Brotos	FJ	1	669 ± 41
Folhas Velhas	FV	4	750 (60)

Tabela 4.15: Valores de concentração de ^{40}K na goiabeira não contaminada GNC1. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parentes o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	N	Valores médios de concentração ^{40}K ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Raiz	R	1	195 ± 17
Tronco Principal	1	1	174 ± 19
Galhos	2	1	244 ± 23
Cascas	1	1	436 ± 28
Brotos	FJ	1	277 ± 19
Folhas Velhas	FV	1	265 ± 19
Folhas Jovens	FJ	1	394 ± 36
Frutos Maduros	GM	1	413 ± 33
Frutos Verdes	GV	4	466 (52)

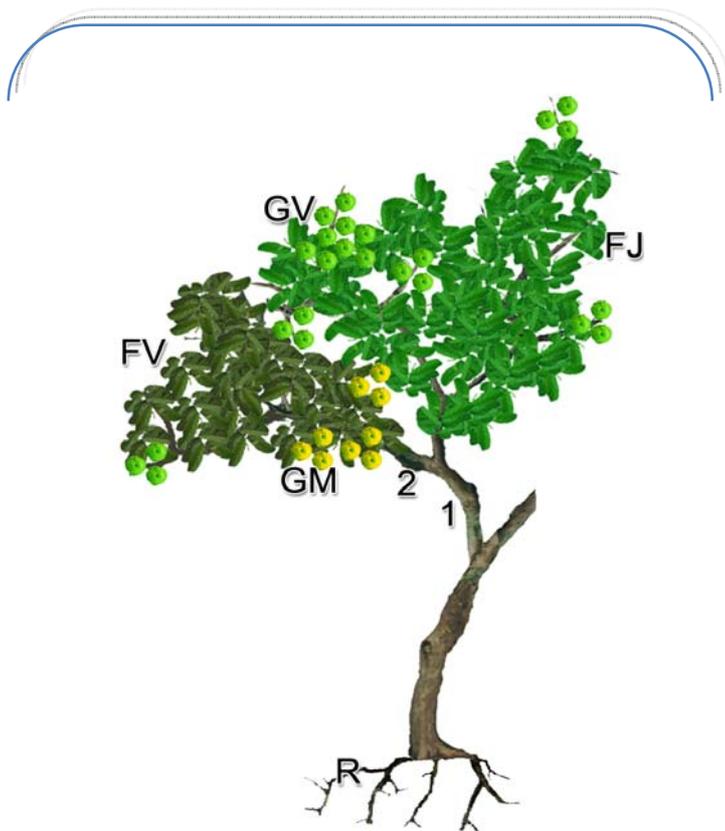


Figura 4.15: Figura esquemática das amostras analisadas na goiabeira GNC1: R é o local de coleta de amostra da raiz, os números 1 e 2 são as amostras do caule, GM representa o local de coleta da amostra de frutos maduros e GV de frutos verdes, FV é o local de coleta de folhas velhas e FJ o local de coleta de brotos e folhas jovens

Na Figura 4.16 podem-se observar os locais de coleta de amostras da goiabeira não contaminada GNC2. Essa goiabeira foi totalmente cortada e foram analisadas amostras do seu tronco principal, suas raízes e um de seus galhos. Essa goiabeira foi dividida em 7 compartimentos: raiz, tronco principal, cascas, galho, brotos, folhas

velhas, folhas jovens. Na Tabela 4.16 podem-se observar os valores de concentração de ^{40}K para as amostras

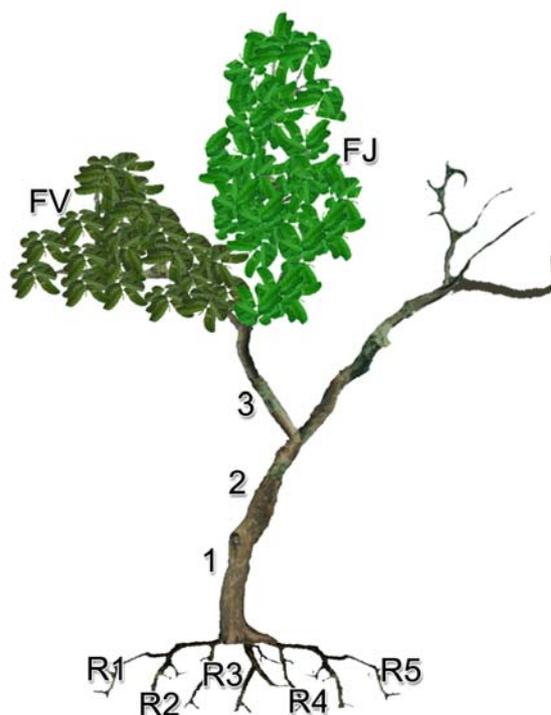


Figura 4.16: Figura esquemática das amostras analisadas na goiabeira GNC2: De R1 até R5 são os locais de coleta de amostra de raízes, os números 1, 2 e 3 são as amostras do caule, GM representa o local de coleta da amostra de frutos maduros e GV de frutos verdes, FV é o local de coleta de folhas velhas e FJ o local de coleta de

Tabela 4.16: Valores de concentração de ^{40}K na goiabeira não contaminada GNC2. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parenteses o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	N	Valores médios de concentração ^{40}K ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Raízes	R1, R2, R3, R4 e R5	5	354 (65)
Tronco Principal	1 e 2	2	406 (42)
Galhos	3	1	377 ± 32
Cascas	1, 2 e 3	1	1023 ± 74
Brotos	FJ	1	669 ± 41
Folhas Velhas	FV	4	750 (60)
Folhas Jovens	FJ	2	1172 (82)

analisadas. O comportamento dessa goiabeira é muito semelhante com o da goiabeira não contaminada GNC1. Essa goiabeira não teve massa de frutos suficientes para completar uma amostra. Nessa goiabeira também as raízes, o tronco principal, e os

galhos, foram os compartimentos de menor concentração de ^{40}K . As folhas jovens foi o compartimento de maior acúmulo desse radionuclídeo, seguido das cascas e das folhas velhas.

De uma forma geral o comportamento das 3 goiabeiras (GC, GNC1 e GNC2) foi semelhante. Não foi observado diferença significativa entre as concentrações tanto de ^{137}Cs quanto de ^{40}K , no tronco principal, nas raízes e nos galhos, sendo sempre esses os compartimentos de menor acúmulo desses radioisótopos. Os compartimentos de crescimento, como os frutos, folhas, cascas e brotos obtiveram os maiores valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K e os compartimentos mais jovens tiveram sempre maior concentração desses elementos do que os compartimentos mais antigos, por exemplo: folhas jovens > folhas velhas, frutos verdes > frutos maduros, brotos > galhos. O comportamento de todas as goiabeiras também se assemelha ao comportamento das mandiocueiras, em relação aos compartimentos que possuem o maior acúmulo de ^{137}Cs e ^{40}K .

4.2.1.4 Mangueiras

Nesse trabalho foi analisada uma mangueira cultivada em solo com a presença de ^{137}Cs , a mangueira MC. Semelhante ao acontecido nas goiabeiras GC e GNC1, foi retirado um galho representativo de dimensões próximas ao do tronco principal e com brotos e folhas suficientes para completarem os compartimentos necessários.

A Figura 4.17 mostra um esquema de como era a mangueira MC e onde foram os locais de coleta das amostras analisadas. Essa mangueira foi dividida em 8 compartimentos, tronco principal, cascas, galhos, talos velhos, brotos, folhas velhas, folhas jovens (verde escuro) e folhas jovens (verde claro). A Tabela 4.17 mostra os valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K dessa mangueira.

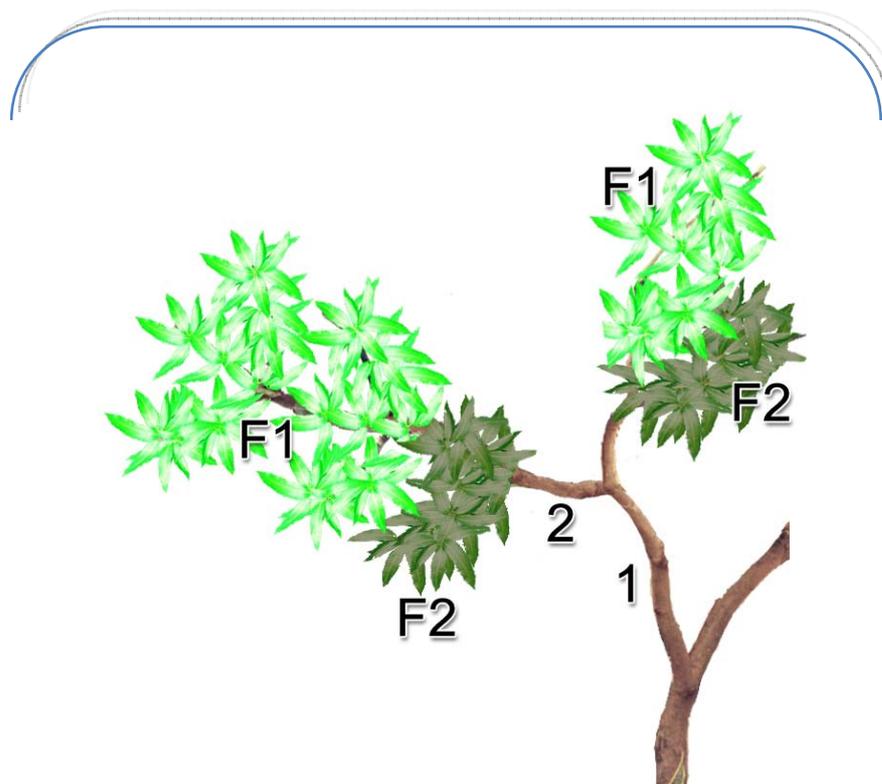


Figura 4.17: *Figura esquemática das amostras analisadas na mangueira MC: Os números 1 e 2 são as amostras do caule, F1 e F2 são os locais de coleta de brotos, talos e folhas.*

O comportamento observado na mangueira MC é semelhante ao das goiabeiras. Os compartimentos de menores valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K foram os galhos e o tronco principal, seguidos das cascas e dos talos velhos. As folhas jovens foi o compartimento de maior concentração, dos brotos e folhas velhas.

Juntamente com as mandioqueiras e as goiabeiras, essa mangueira seguiu o mesmo comportamento quando a distribuição de ^{137}Cs e ^{40}K em relação aos compartimentos, tendo os galhos e tronco principal sempre menor acúmulo do que os compartimentos aéreos. Isso mostra uma tendência de plantas lenhosas terem um comportamento semelhante em relação ao acúmulo de ^{137}Cs e ^{40}K nos compartimentos analisados.

Tabela 4.17: Valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K na mangueira contaminada MC. Os valores após o sinal de \pm representam a incerteza experimental da amostra e os valores entre parentes o desvio da média. A coluna N representa o número de amostras analisadas.

Compartimento	Legenda	Valores médios de concentração		
		N	^{137}Cs (Bq.kg $^{-1}$)	^{40}K (Bq.kg $^{-1}$)
Tronco Principal	1	1	243 \pm 9	173 \pm 33
Galhos	2	1	227 \pm 7	178 \pm 36
Cascas	1 e 2	1	349 \pm 12	624 \pm 99
Talos Velhos	F3	2	369 (21)	271 (18)
Brotos	F1 e F2	2	762 (33)	650 (48)
Folhas Velhas	F3	3	431(26)	330(17)
Folhas Jovens	F2	4	852(99)	540(21)

4.2.2 Distribuição Radial

A análise radial permite uma investigação detalhada do comportamento dos radionuclídeos em função do raio ou dos anéis de crescimento do caule. Diferentemente do que encontrado na literatura, nosso grupo tem realizado análises bidimensionais do comportamento do ^{137}Cs e ^{40}K . Este procedimento permite obter resultados mais abrangentes.

4.2.2.1 Mamoeiros

A Figura 4.18 mostra um gráfico bidimensional da distribuição de ^{137}Cs e ^{40}K , nos disco A, B e C da papaieira PC1. Analisando-se a distribuição de cores, as concentrações dos radionuclídeos analisados aumentam a mediada que as cores variam

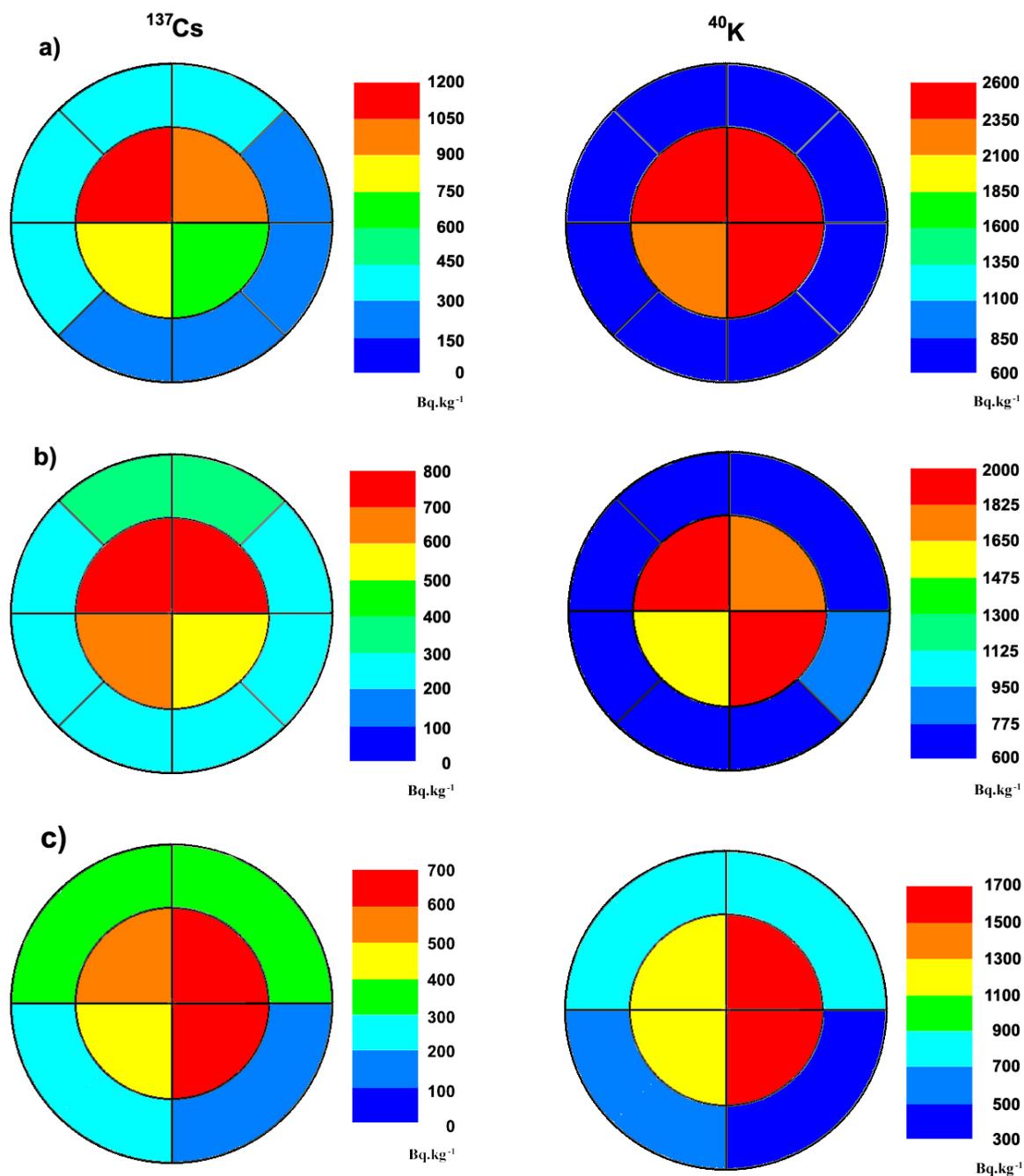


Figura 4.18: Diagrama bidimensional das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K na papaieira contaminada PCI, nos discos: a) A, b) B e c) C. A variação das cores desde o azul escuro até o vermelho representa o aumento dos valores de concentração.

do azul mais escuro até o vermelho. A partir destas Figuras é possível observar que tanto o Cs quanto o K apresentam distribuições semelhantes, sendo os maiores valores de concentrações na parte interna do caule do mamoeiro. O mesmo efeito é observado na papaieira PC2, conforme apresentado na Figura 4.20. O mesmo tipo de análise foi

realizado na papaieira não contaminada PNC. Este comportamento é justificado pelo fato de que o transporte dos nutrientes ocorre pela parte interna do caule dessas plantas.

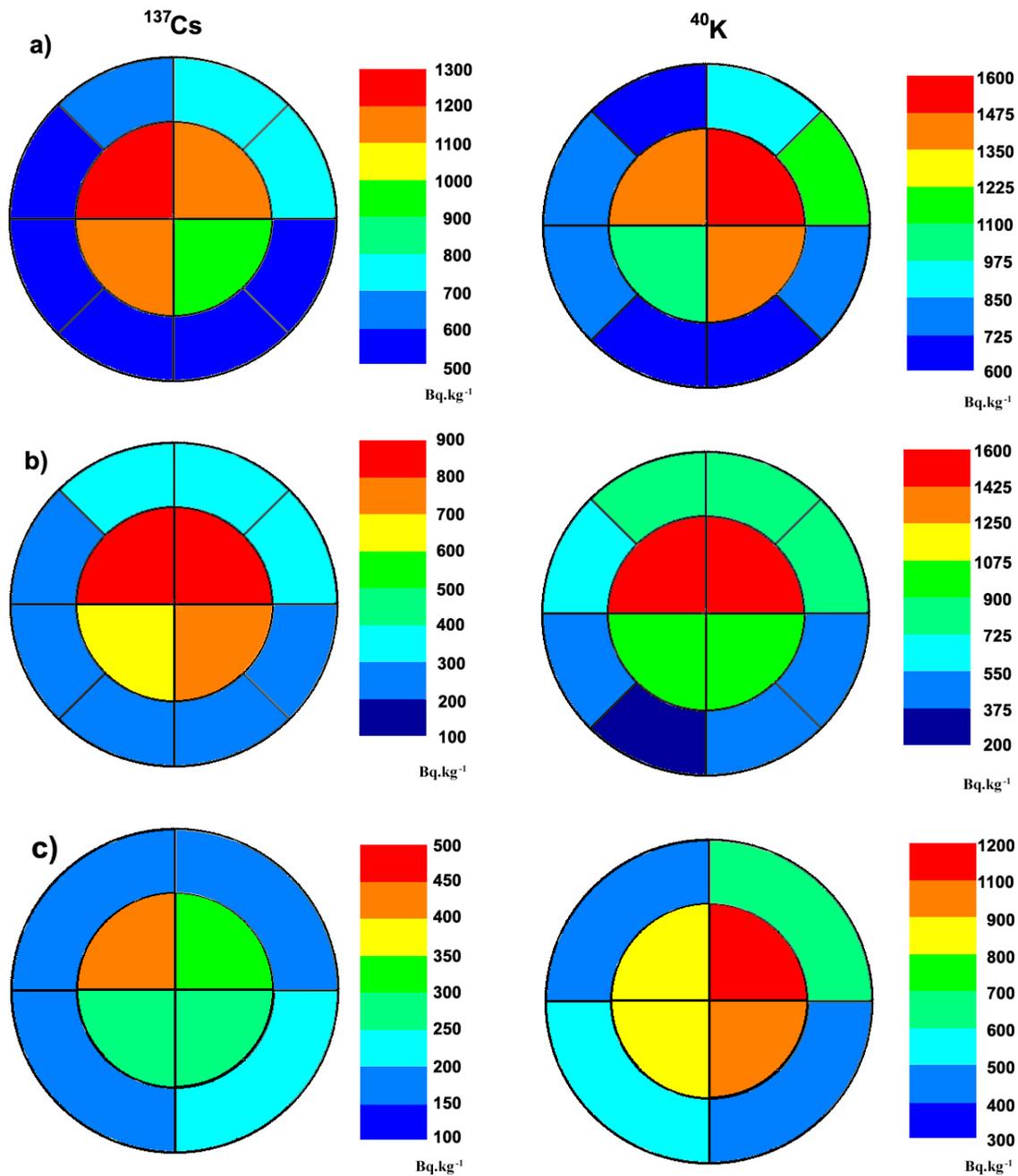


Figura 4.19: Diagrama bidimensional das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K na papaieira contaminada PC2, nos discos: a) A, b) B e c) C. A variação das cores desde o azul escuro até o vermelho representa o aumento dos valores de concentração.

4.2.2.2 Bananeiras

Procedimentos semelhantes ao realizado para os mamoeiros foram realizados para a investigação da distribuição bidimensional de ^{137}Cs e ^{40}K nas bananeiras BC. Dos pseudocaules dessas bananeiras foram retiradas secções transversais em forma de discos para a análise. Como já foi mencionado no capítulo 2, o pseudocaulo das bananeiras são formados por uma parte interna suculenta (onde se dá o transporte dos nutrientes) com as bainhas das folhas antigas que vão se superpondo uma as outras sobre esta parte interna. Assim, quando separados os discos do pseudocaulo a separação das amostras para a análise bidimensional foi feita seguindo essa divisão natural estabelecida pela planta. Cada bainha de folha que se juntou ao caule originou uma amostra da parte externa, até chegar ao centro. Esse então originou as amostras da parte interna do pseudocaulo.

Para bananeira contaminada BC foram analisados dois discos. O disco A encontrava-se próximo à base e o disco B a 1 metro, aproximadamente, do solo. A distribuição bidimensional de ^{137}Cs e ^{40}K para o disco A pode ser observada na Figura 4.22a. A Figura 4.22b apresenta a distribuição para o disco B. Pode-se observar que a distribuição de ^{137}Cs parece ter um comportamento semelhante a distribuição de ^{40}K . Para o disco A as concentrações desses dois elementos são mais elevadas nas extremidades dos discos e vão diminuindo à medida que se aproximam do centro. O mesmo comportamento foi evidenciado para o disco B.

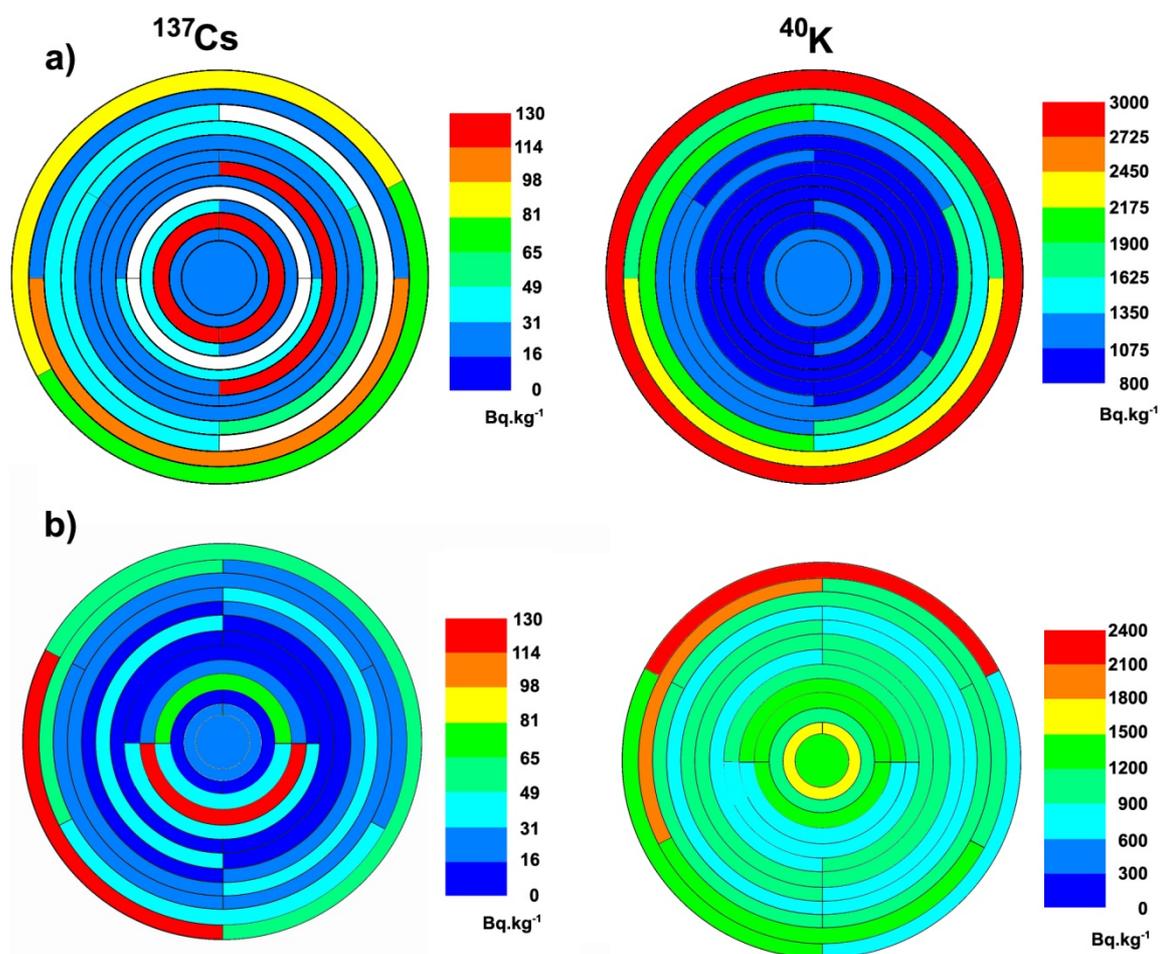


Figura 4.20: Diagrama bidimensional das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K na bananeira contaminada BC, nos discos: a) A e b) B. A variação das cores desde o azul escuro até o vermelho representa o aumento dos valores de concentração.

4.3 Correlações de transporte e acúmulo de ^{137}Cs e ^{40}K

O estudo das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K pode trazer muitas informações a respeito do funcionamento de organismos biológicos, bem como tentar compreender os principais mecanismos de absorção, transporte e acúmulo de nutrientes pelos vegetais. Além disso, em situações de acidente nuclear ou radiológico, é possível prever como acontecerá a contaminação e descontaminação do ecossistema, uma vez que os

radionuclídeos ficam presentes no meio ambiente na forma de íons e podem ser absorvidos pelos vegetais.

Com isso, o fator de transferência (FT) tem sido muito usado para tentar responder alguma dessas perguntas. Entretanto, como foi mostrado no capítulo 3, as incertezas provenientes da sua formulação fazem com que novos mecanismos sejam elaborados para a melhor compreensão dos fenômenos citados acima.

Além disso, é fundamental aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos que envolvem a absorção e transporte de cátions inorgânicos monovalentes, uma vez que os resultados apresentados anteriormente revelam que há uma grande semelhança entre o comportamento do ^{137}Cs com ^{40}K . Esta evidência pode estar indicando que este radionuclídeo possa ser usado como traçador destes elementos.

4.3.1 Fator de Concentração (FC)

Conforme observado nos resultados apresentados, os radionuclídeos têm a capacidade de acumular-se nos diferentes compartimentos das plantas e os valores das suas concentrações podem ser estimados se existir uma correlação entre as concentrações desses compartimentos. Com o intuito de avaliar a existência dessa correlação será proposto um mecanismo simples, a fim de detectar esse fator de concentração em relação a um compartimento fixo, o FC.

Uma vez que os nutrientes são absorvidos pelas raízes das plantas, eles possuem a capacidade de migrar pelo seu interior e ser transportado para respectivos compartimentos de crescimento da planta, a fim de exercerem seus papéis fisiológicos naturais. Com isso, essa proposta visa normalizar as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K nesses compartimentos pela concentração das raízes. Entretanto, é observado pelos trabalhos realizados no grupo que as concentrações desses radionuclídeos na raiz principal dos

vegetais estudados são praticamente iguais às concentrações no interior do caule principal e até mesmo de galhos mais velhos. Desse modo, a parte interna do caule principal foi escolhida para normalizar as concentrações dos outros compartimentos, ainda sendo corroborado com o fato de que as análises possam ser feitas, sem a necessidade de danificar o crescimento da planta de interesse. Além disso, também é extraído um fator complicador, onde foi observado que algumas amostras de raízes apresentaram um elevado grau de impregnação ou incrustação de ^{137}Cs proveniente do contato da raiz com o solo e não simplesmente do seu processo de absorção.

Assim, o Fator de Concentração nos compartimentos (FC) pode ser definido como:

$$FC_j = \frac{C_j}{C_{Caule}} \quad (4.2)$$

onde C_j são os valores de concentração, em Bq.kg^{-1} , de ^{137}Cs ou ^{40}K no compartimento j e C_{caule} é a concentração de ^{137}Cs ou ^{40}K , em Bq.kg^{-1} , no caule principal.

A partir dos valores apresentados nas Tabelas 4.3 a 4.6 para as mandioqueiras contaminadas por ^{137}Cs foram calculados os valores de $\text{FC}[\text{Cs}]$ e $\text{FC}[\text{K}]$ para essas plantas. Os valores médios obtidos são apresentados na Tabela 4.18. De forma análoga, foram calculados os valores de $\text{FC}[\text{Cs}]$ e $\text{FC}[\text{K}]$ nos compartimentos analisados para a papaieira (PC1), a bananeira (BC), a goiabeira (GC) e a mangueira (MC). Os valores obtidos são apresentados nas Tabelas 4.19 a 4.22, respectivamente. Além disso, também são apresentados os valores de $\text{FC}[\text{K}]$ para as plantas não contaminadas, como: a mandioqueira (MNC3), a bananeira (BNC), papaieira (PNC), e as goiabeiras (GNC1 e GN2).

Na Tabela 4.18 podem ser observados que os valores de $\text{FC}[\text{Cs}]$ e $\text{FC}[\text{K}]$ para as mandioqueiras contaminadas mostraram valores semelhantes para todos os

compartimentos, tendo, exceto o tubérculo, apresentado valores maiores que o tronco principal. As raízes e os galhos apresentaram concentração próxima a 1, evidenciando a semelhança entre o acúmulo desses radionuclídeos nesses compartimentos. Os valores de FC[K] para a mandioqueira não contaminada MNC3 apresentou valores semelhantes ao FC[K] das mandioqueiras contaminadas, revelando não haver diferença no acúmulo de ^{40}K em mandioqueiras com, ou sem a presença de ^{137}Cs no solo onde foram cultivadas.

Tabela 4.18: Valores de Fatores de Concentração (FC) nas mandioqueiras MC1 até MC4 e MNC3. Os valores entre parenteses representam o desvio da média.

j	Compartimento	Fatores de Concentração		
		(MC1 até MC4)		MNC3
		FC[Cs]	FC[K]	FC[K]
1	Raiz principal	1,13(0,14)	1,09(0,12)	1,04(0,11)
2	Tubérculo	0,86(0,11)	0,82(0,04)	0,73(0,04)
3	Tronco Principal	1,00(0,12)	1,00(0,05)	1,00(0,05)
4	Cascas	2,28(0,36)	2,37(0,13)	2,19(0,12)
5	Galhos	1,11(0,18)	1,11(0,10)	0,83(0,06)
6	Brotos	1,34(0,15)	1,25(0,13)	1,30(0,15)
7	Folhas Velhas	1,40(0,14)	1,18(0,15)	1,10(0,10)
8	Folhas Novas	1,81(0,18)	1,67(0,13)	1,57(0,10)

Para as papaieiras PC1 os valores de FC[Cs] e FC[K] também foram semelhantes, como pode ser visto na Tabela 4.19. Os valores de FC [K] para a papaieira PNC mostraram uma distribuição semelhante aos valores de FC da papaieira PC1. É interessante notar que esses valores mostraram um comportamento bem distinto ao das

mandioqueiras. Exceto pelas raízes, os valores de FC[Cs] e FC[K] foram todos menores do que 1. Indicando que os outros compartimentos, inclusive os compartimentos de crescimento, como folhas e frutos, não acumulam maiores níveis de concentração do que a parte interna do tronco principal, sendo essa a parte da planta de maior reserva desses elementos. As raízes da papaieira PC1 apresentaram valores de FC[Cs] e FC[K] próximo a 1, confirmando a semelhança entre o comportamento de ^{137}Cs e ^{40}K entre esse compartimento e a parte interna do caule principal.

Tabela 4.19: Valores de Fatores de Concentração (FC) para as papaieiras PC1 e PNC. Os valores entre parenteses representam o desvio da média.

j	Compartimento		Fatores de Concentração		
			PC1		PNC
			FC[Cs]	FC[K]	FC[K]
1	Raiz Principal		1,36(0,25)	1,12(0,15)	-
2	Tronco Principal	Externo	0,38(0,09)	0,35(0,06)	0,49(0,12)
3		Interno	1,00(0,23)	1,00(0,18)	1,00(0,21)
4	Talos		0,71(0,12)	1,05(0,14)	-
5	Folhas		0,54(0,09)	0,64(0,08)	0,49(0,10)
6	Frutos	Sementes	0,45(0,08)	0,43(0,06)	-
7		Polpas	0,66(0,11)	0,82(0,11)	0,53(0,08)
8		Cascas	0,66(0,16)	0,82(0,18)	0,49(0,10)

As bananeiras BC e BNC tiveram um comportamento em relação aos valores de FC semelhante ao encontrado pelas papaieiras. Na Tabela 4.20 pode-se observar que todos os valores de FC para as bananeiras são semelhantes e novamente esses resultados

foram menores do que 1 para os compartimentos aéreos dessa planta, indicando que, assim como as papaieiras, a parte interna do caule (ou pseudocaule, no caso das bananeiras) é a região de maior acúmulo desses elementos, mostrando que diferentemente do que ocorre no tronco principal das mandioqueiras, essa é uma região de alta atividade metabólica.

Tabela 4.20: Valores de Fatores de Concentração (FC) para as bananeiras BC e BNC. Os valores entre parenteses representam o desvio da média.

j	Compartimento		Fatores de Concentração		
			BC		BNC
			FC[Cs]	FC[K]	FC[K]
1	Pseudocaule	Externo	1,33(0,35)	0,96(0,24)	0,57(0,12)
2		Interno	1,00(0,10)	1,00(0,07)	1,00(0,05)
3	Talos		0,69(0,09)	0,57(0,13)	0,59(0,05)
4	Folhas		0,48(0,06)	0,49(0,09)	0,52(0,04)
5	Frutos	Polpa	0,30(0,03)	0,36(0,02)	0,51(0,03)
6		Cascas	0,82(0,12)	0,89(0,08)	

Na Tabela 4.21 é possível observar que para as goiabeiras GC, CNC1 e GNC2 os valores de FC encontrados para os compartimentos aéreos dessas árvores são todos maiores que 1, mostrando um comportamento distinto em relação às papaieiras e às bananeiras e semelhante ao comportamento das mandioqueiras. Entretanto, no caso das goiabeiras GNC1 e GNC2, os valores de FC[K] são semelhantes entre essas duas plantas, mas distintos aos valores de FC[Cs] e FC[K] encontrados para a goiabeira contaminada GC. Os compartimentos aéreos (brotos, folhas, e frutos) dessa goiabeira (GC) apresentaram valores de FC aproximadamente 3 vezes maiores que os valores para

as goiabeiras não contaminadas e valores semelhantes para os outros compartimentos. Por outro lado, analisando somente a goiabeira GC, os valores de FC[Cs] e FC[K] são semelhantes entre si.

Tabela 4.21: Valores de Fatores de Concentração (FC) para as goiabeiras GC, GNC1 e GNC2. Os valores entre parenteses representam o desvio da média.

j	Compartimento	Fatores de Concentração			
		GC		GC1	GC2
		FC[Cs]	FC[K]	FC[K]	FC[K]
1	Tronco Principal	1,00(0,07)	1,00(0,20)	1,00(0,13)	1,00(0,15)
2	Cascas	2,95(0,17)	2,31(0,34)	2,51(0,33)	2,52(0,32)
3	Galhos	0,95(0,07)	1,01(0,20)	1,40(0,23)	0,92(0,12)
4	Brotos	2,74(0,16)	2,24(0,34)	1,59(0,18)	1,65(0,20)
5	Folhas Velhas	2,69(0,15)	3,73(0,53)	1,52(0,18)	1,85(0,24)
6	Folhas Novas	5,31(0,40)	4,77(0,78)	2,96(0,29)	2,89(0,36)
7	Frutos Verdes	4,71(0,24)	4,30(0,61)	2,68(0,39)	-

Na mangueira contaminada MC o mesmo comportamento foi observado para os valores de FC, sendo esses sempre maiores que 1, semelhante ao que acontece nas goiabeiras e mandioqueiras. Na Tabela 4.22 pode-se observar a mangueira MC apresentou um comportamento em relação aos valores de FC[Cs] e FC[K], referentes aos compartimentos aéreos, semelhantes aos valores encontrados para as goiabeira, sendo esses compartimentos cerca de 2 a 4 vezes mais concentrados do que o tronco principal.

Tabela 4.22: Valores de Fatores de Concentração (FC) para a mangueira MC. Os valores entre parenteses representam o desvio da média.

j	Compartimento	Fator de Concentração	
		MC	
		FC[Cs]	FC[K]
1	Tronco Principal	1,00(0,05)	1,00(0,19)
2	Cascas	1,43(0,07)	1,53(0,22)
3	Galhos	1,52(0,10)	1,57(0,24)
4	Brotos	3,14(0,18)	3,76(0,57)
5	Folhas Velhas	1,77(0,14)	1,91(0,27)
6	Folhas Novas (verde escuro)	3,51(0,43)	3,12(0,42)

Com isso, a utilização dos Fatores de Concentração (FC) se mostrou bastante interessante a fim de se avaliar com maior clareza a distribuição de ^{137}Cs e ^{40}K no interior dos compartimentos dos vegetais. Os valores de FC fizeram distinção entre dois grupos de espécies de plantas analisadas, mostrando um comportamento semelhante entre as plantas lenhosas como; as mandioqueiras, goiabeiras e mangueiras, que por sua vez é diferente das papaieiras e bananeiras. Também serviu para indicar um comportamento semelhante entre algumas das plantas, contaminadas e não contaminadas, a menos das goiabeiras que mostraram comportamentos distintos entre as plantas não contaminadas e as contaminadas. Os possíveis motivos para essa distinção serão estudados mais adiante.

Adicionalmente, mostrou-se que os valores de FC[Cs] são semelhantes aos valores de FC[K] das plantas contaminadas, entretanto, a fim de se avaliar isso com maior clareza será proposto a seguir uma ferramenta para essa análise.

4.3.2 Fator de Discriminação K/Cs (FD)

Uma vez conhecido os Fatores de Concentração (FC) entre os compartimentos de uma determinada planta em relação ao tronco principal, se esses valores são iguais tanto para ^{137}Cs quanto para ^{40}K , é possível concluir que o ^{137}Cs é um bom traçador de potássio no interior desse vegetal. Assim, o Fator de Discriminação de K/Cs (FD) em cada compartimento pode ser definido como:

$$FD_j = \frac{FC[K]_j}{FC[Cs]_j} \quad (4.3)$$

onde, FD_j é o Fator de Discriminação de K/Cs e $FC[K]_j$ e $FC[Cs]_j$ são os Fatores de Concentração de ^{40}K e ^{137}Cs , respectivamente, para cada compartimento j .

Uma vez calculado os valores de FD para cada compartimento dos vegetais analisados, quanto mais perto de 1 os valores de FD se aproximarem, mais o ^{137}Cs se assemelha ao potássio, indicando que ele poderia ser usado como traçador desse nutriente no interior desse determinado vegetal. As Figuras 4.21 até 4.25 mostram os valores de FD para as plantas analisadas nesse trabalho.

Para as mandioqueiras contaminadas os valores de FD em cada compartimento tiveram valores próximos de 1 com desvio de cerca de 5% do seu valor médio. Como podem ser vistos na Figura 4.21, a linha pontilhada no valor de FD igual a 1 é tocada, no mínimo, por todas as barras de erros de cada compartimento analisado.

Para a papaieira contaminada PC1 os valores de FD para cada compartimento também se aproximaram da unidade, assim como pode ser visto na Figura 4.22. O desvio ficou em cerca de 16% do seu valor médio.

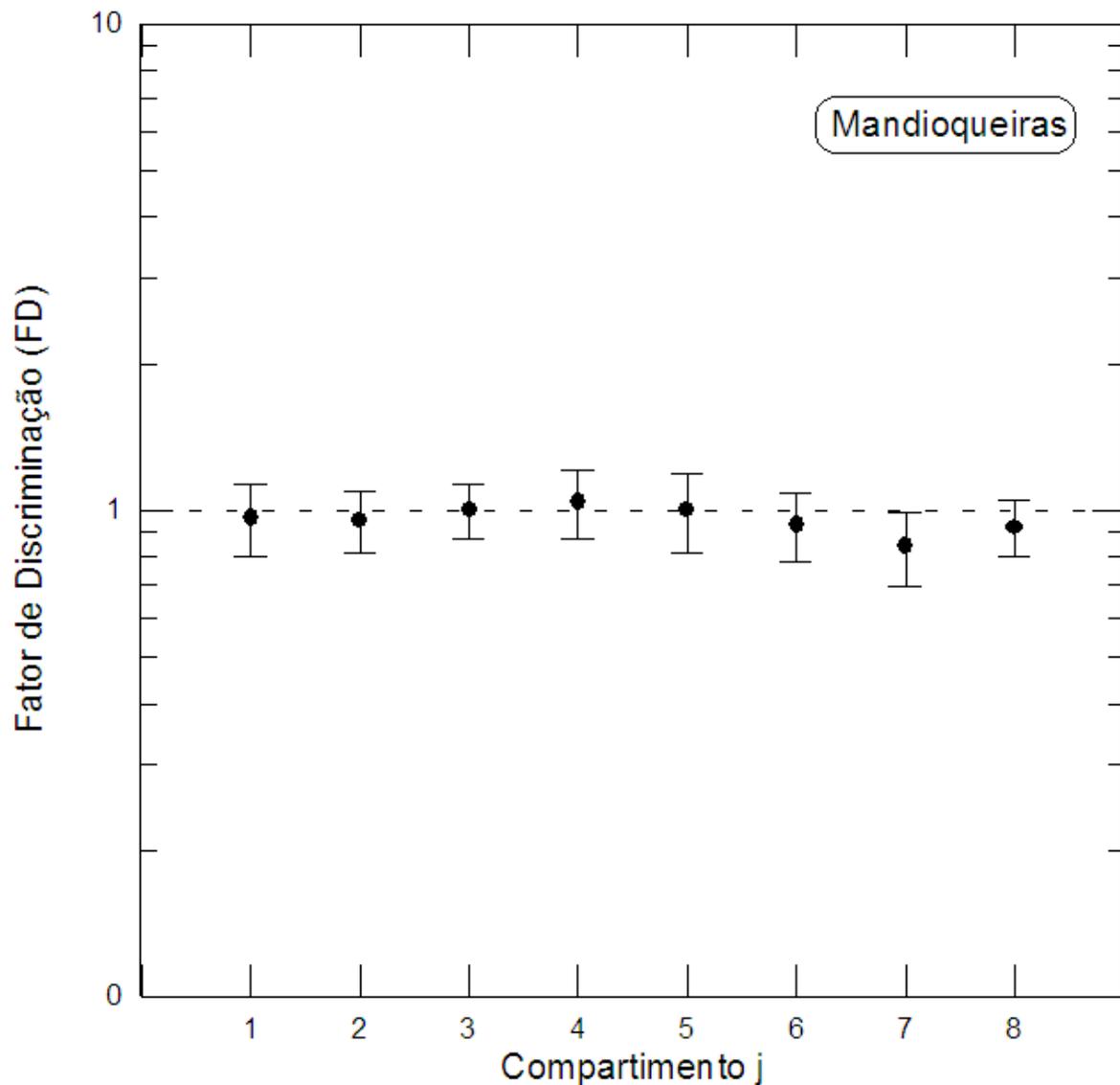


Figura 4.21: Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para as mandiocouras contaminadas. $J=1$ representa as raízes, $J=2$ as mandiocas, $j=3$ o tronco principal, $j=4$ as cascas, $j=5$ os galhos, $j=6$ os brotos, $j=7$ as folhas velhas e $j=8$ as folhas novas.

Como é possível notar na Figura 4.23, para a bananeira contaminada BC os valores de FD aproximaram-se de 1 em todos os compartimentos, com um desvio de cerca de 9% do seu valor médio.

Para a goiabeira contaminada, pode ser visto na Figura 4.24 que os valores de FD são todos próximos de 1, com desvio médio em torno de 17%. Para a mangueira

MC, na Figura 4.25, é possível observar que também para essa árvore os valores de FD são próximos a 1, com um desvio médio de cerca de 7%.

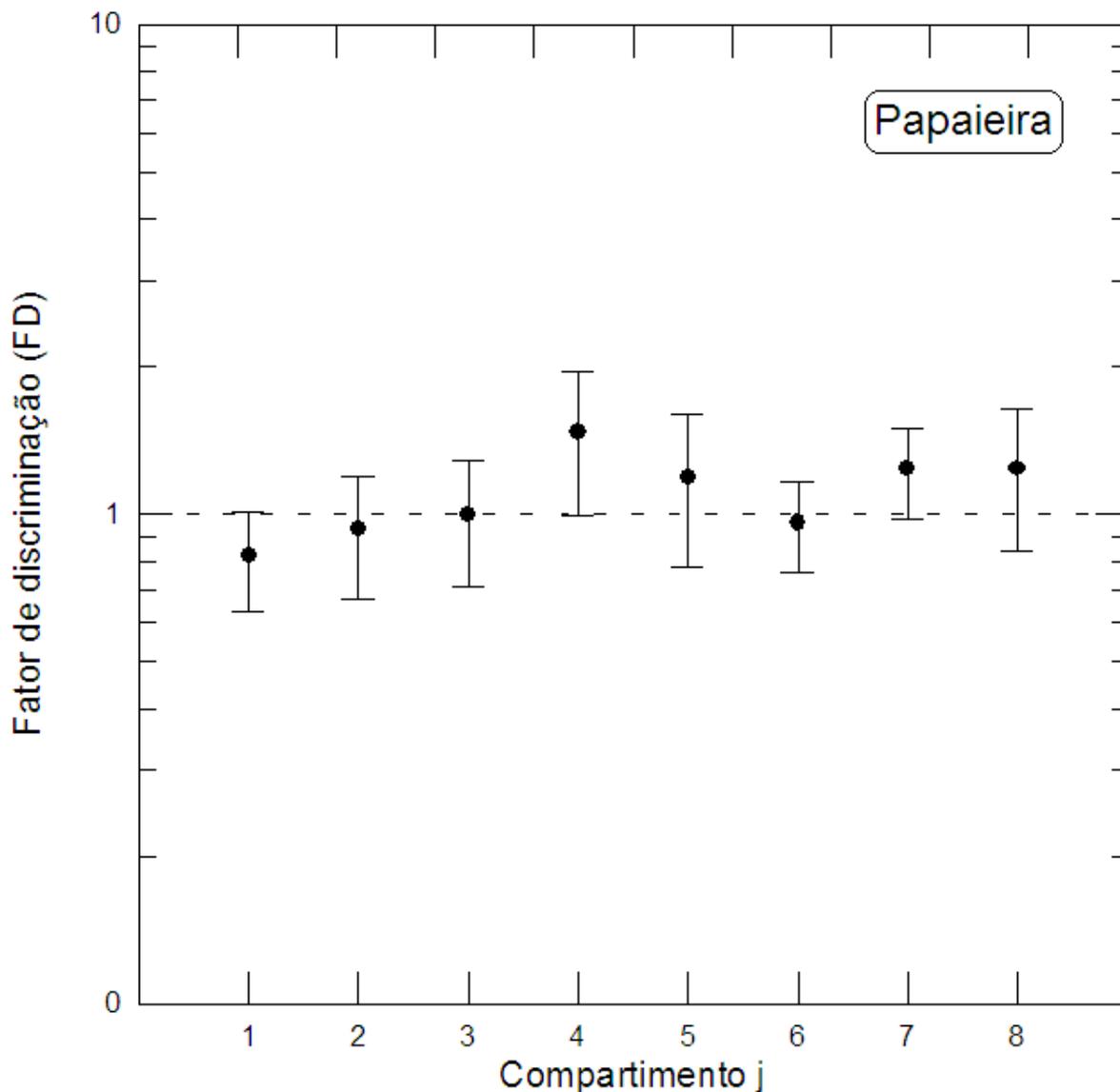


Figura 4.22: Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para a papaieira contaminada PCI. $J=1$ representa as raízes, $J=2$ o tronco principal (parte externa), $j=3$ o tronco principal (parte interna), $j=4$ os talos, $j=5$ as folhas, $j=6$ as sementes, $j=7$ a polpa e $j=8$ as cascas dos frutos.

É possível observar que para todos os compartimentos de todos os vegetais analisados nesse trabalho os valores de FD são aproximadamente iguais a 1, indicando que apesar dos diferentes comportamentos que foram evidenciados pelos fatores de

concentração (FC), referentes às diferentes espécies de plantas tropicais estudadas, em todas elas o ^{137}Cs mostrou ter um comportamento semelhante ao ^{40}K podendo ser utilizado como rastreador para as concentrações médias nos compartimentos.

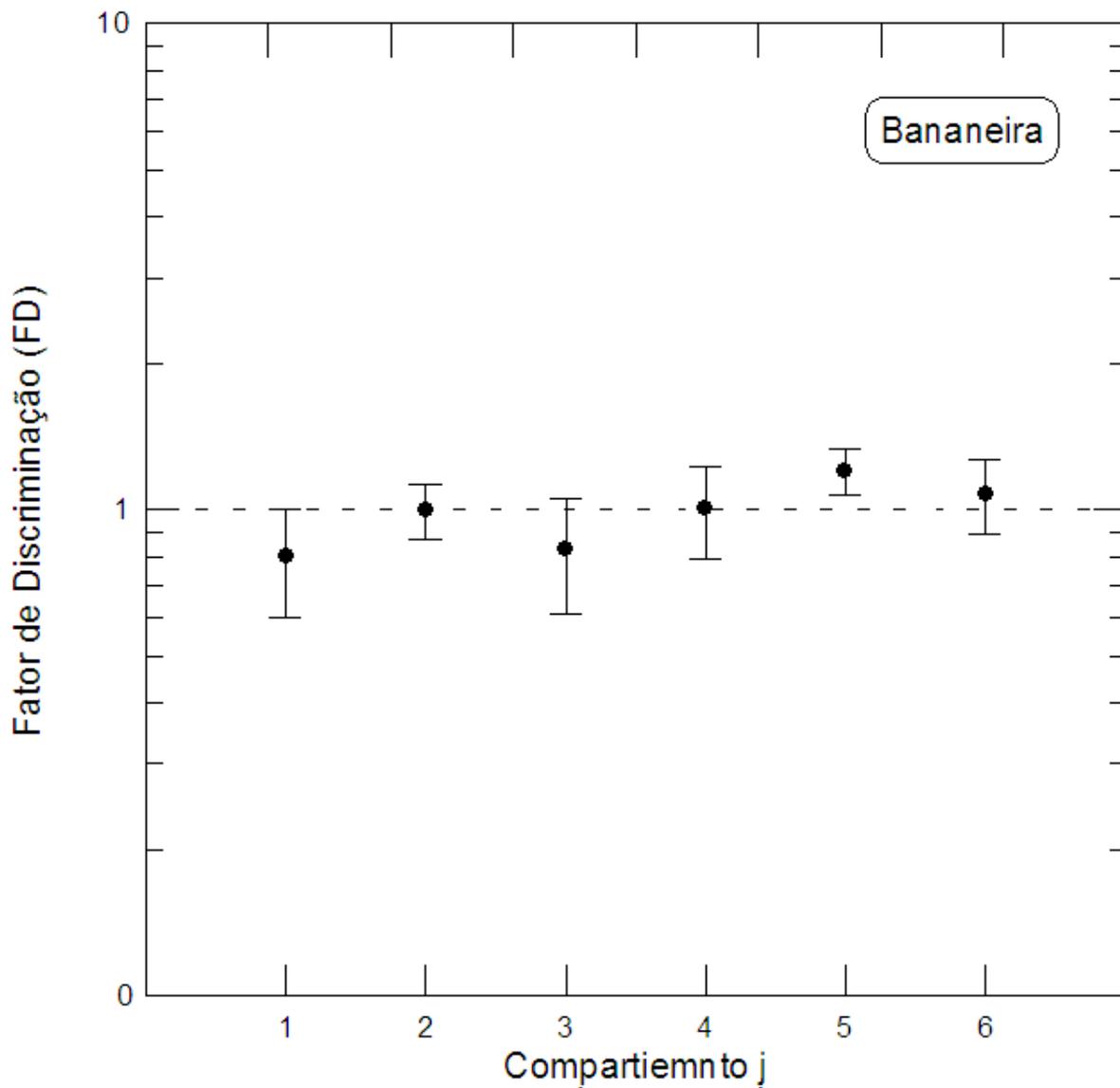


Figura 4.23: Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para a bananeira contaminada BC. J=1 representa a parte externa e J=2 a parte interna do pseudocaule, j=3 são os talos das folhas, j=4 as folhas, j=5 a polpa dos frutos e j=6 as cascas dos frutos.

4.3.3 Fatores influenciadores nos valores de FC

A nova proposta apresentada nesse trabalho de utilizar os fatores de concentração (FC) entre os compartimentos não leva em consideração as concentrações no solo. Essa discussão já foi realizada no capítulo 3 onde são mostrados os problemas resultantes da heterogeneidade do solo. Entretanto, os valores de FC[Cs], FC[K] e FD,

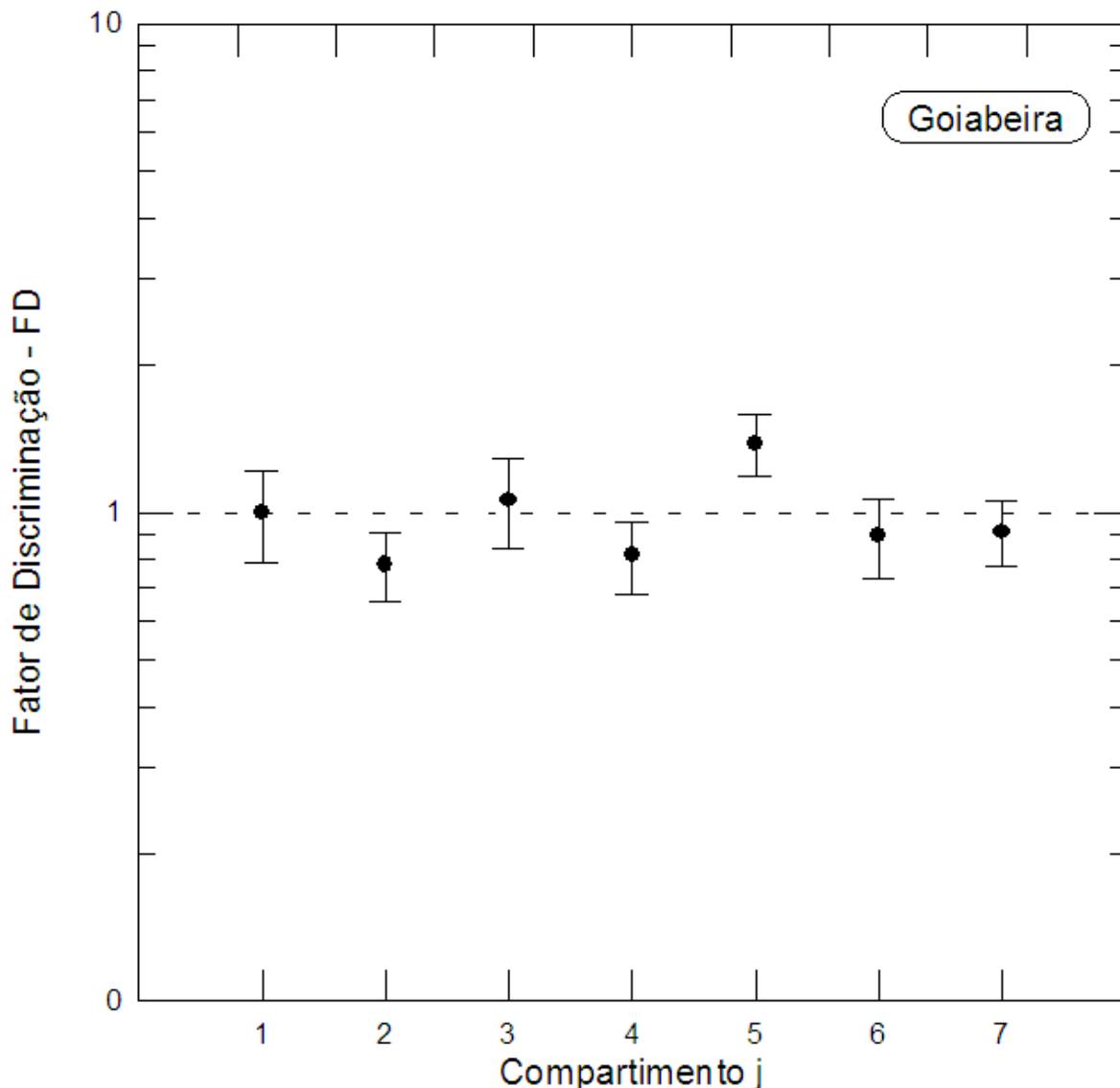


Figura 4.24: Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para a goiabeira contaminada GC. J=1 representa o tronco principal, J=2 as cascas, j=3 são galhos, j=4 brotos, j=5 folhas velhas, j=6 folhas novas e j=7 frutos verdes.

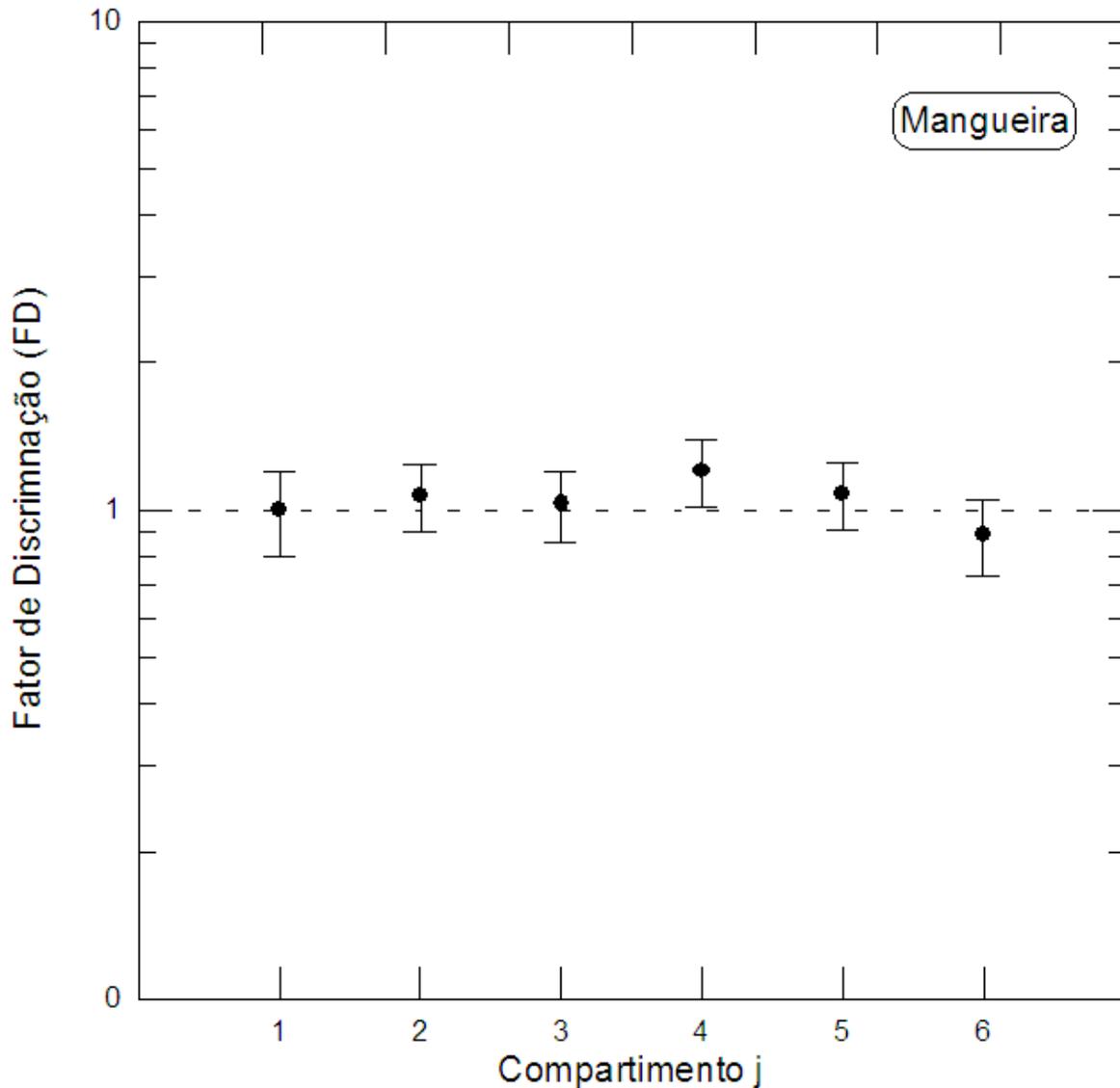


Figura 4.25: Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para a mangueira contaminada MC. $J=1$ representa o tronco principal, $J=2$ as cascas, $j=3$ são galhos, $j=4$ brotos, $j=5$ folhas velhas e $j=6$ folhas jovens.

para a goiabeira GC e a mangueira MC, apresentados na seção anterior revelou um fenômeno interessante. Isso começou a ser evidenciado quando foi observado que as goiabeiras não contaminadas GNC1 e GNC2 apresentaram valores de FC[K] semelhantes entre si, mas diferentes aos valores de FC da goiabeira contaminada GC.

Essas amostras foram coletadas no início do ano de 2007 (maio) com o objetivo de aprofundar os estudos antes realizados pelo nosso grupo para esses tipos de vegetais. As amostras referentes às plantas contaminadas coletadas anteriormente são provenientes do mesmo local. Elas foram coletadas em agosto de 2001, sendo feitas análises em uma goiabeira que se localizava a 5 metros de distância da goiabeira desse trabalho e na mesma mangueira desse trabalho. Valores de FC e FD foram realizados recentemente nessas amostras e esses resultados estão aceitos para publicação [Anjos *et al.*, 2008].

Na Figura 4.26a e 4.26b pode-se observar os resultados de FC[Cs] e FC[K] para essas duas goiabeiras analisadas em função dos compartimentos. Note que existe uma diferença nos valores de FC para as duas goiabeiras. No trabalho anterior, esses valores para os compartimentos aéreos (brotos, folhas, e frutos) são menores que para esse trabalho. Entretanto, quando avaliamos os valores de FD (Figura 4.27a) para as duas situações os resultados para cada compartimento se aproximam de 1.

O mesmo comportamento foi observado para a mangueira, como pode ser visto na Figura 4.26c e 4.26d. Nas análises desse trabalho também foi verificado que os valores de FC são maiores nos compartimentos aéreos do que na análise feita em 2001 nessa mesma árvore. Entretanto, mais uma vez os valores de FD mostraram-se aproximadamente 1 nessas duas situações, assim como mostra a Figura 4.27b.

Isso nos permite concluir que apesar dos Fatores de Concentração (FC) se mostrarem melhor em prever as concentrações nos compartimentos do que o Fator de Transferência (FT), devido aos problemas relacionados ao solo, fatores externos ainda contribuem no acúmulo e transporte desses radionuclídeos para o interior das plantas, não podendo o FD ser extrapolado para ecossistemas diferentes, ou em condições externas diferentes.

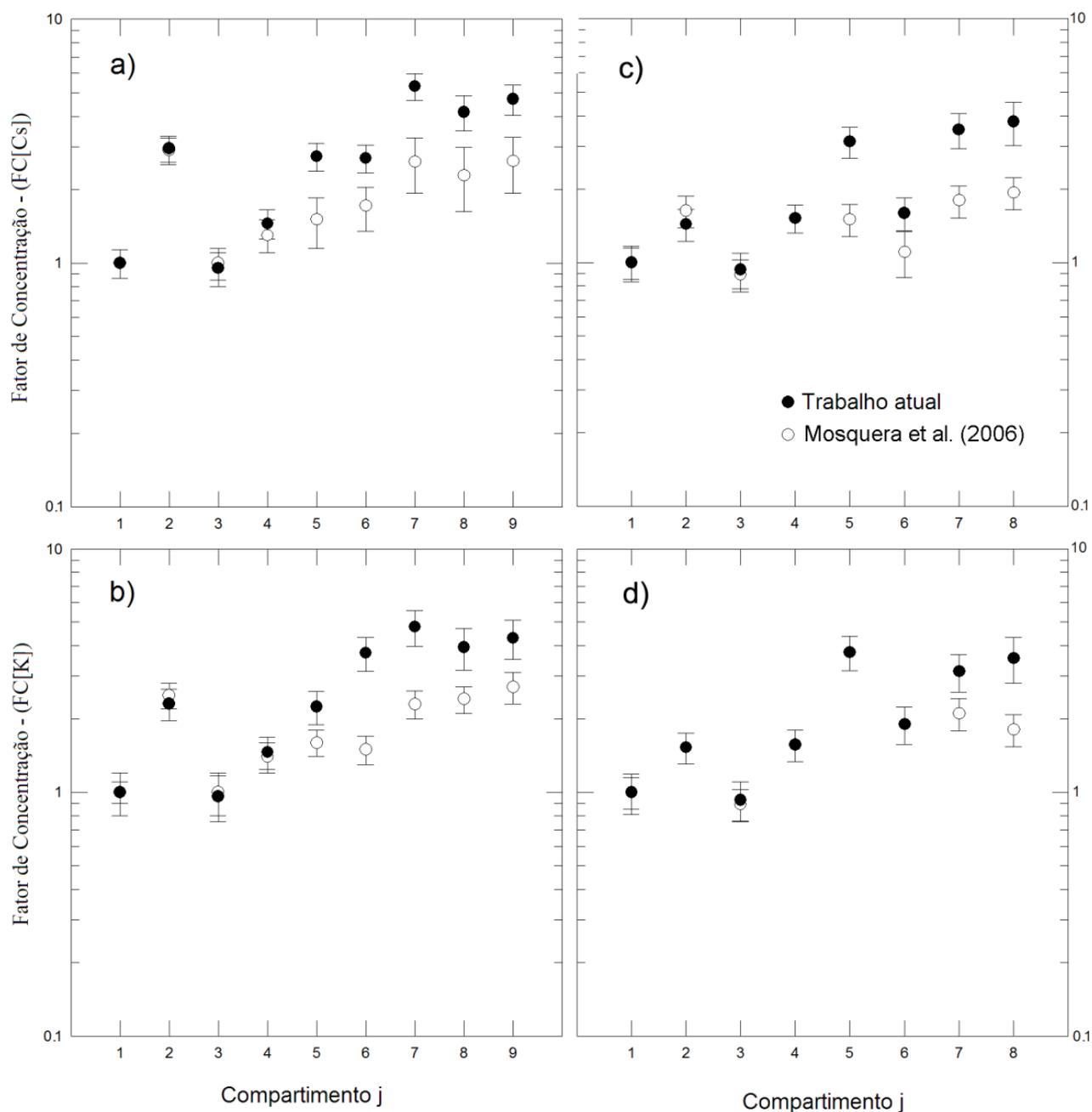


Figura 4.26: Fatores de Concentração (FC) em função do compartimento j para: a) e b) as goiabeiras contaminadas e c) e d) a mangueira contaminada MC, em um trabalho anterior e nesse trabalho. $J=1$ representa o tronco principal, $j=2$ as cascas, $j=3$ são galhos, $j=4$ galhos jovens, $j=5$ brotos, $j=6$ folhas velhas, $j=7$ folhas jovens. $j=8$ frutos verdes e $j=9$ frutos maduros.

Como foi relatado no capítulo 2, após a intervenção realizada pela CNEM - Comissão Nacional de Energia Nuclear - em agosto de 2001, o local onde são cultivadas essas plantas levou uma camada de concreto ficando a goiabeira GC e a mangueira MC mantidas nesse local. Com isso, o solo passou a não ter mais contato direto com o sol

fazendo com que a sua umidade aumentasse. Comparando a composição do solo antes e depois da aplicação da camada de concreto foram verificadas algumas mudanças: o pH variou de 7,75 para 6,76, o percentual de areia mudou de 58% para 49%, de silte mudou de 35% para 43% e a quantidade de argila variou de 7% para 8%. A concentração de íons de potássio K^+ variou de 0,5 para 1,4 $cmol.kg^{-1}$.

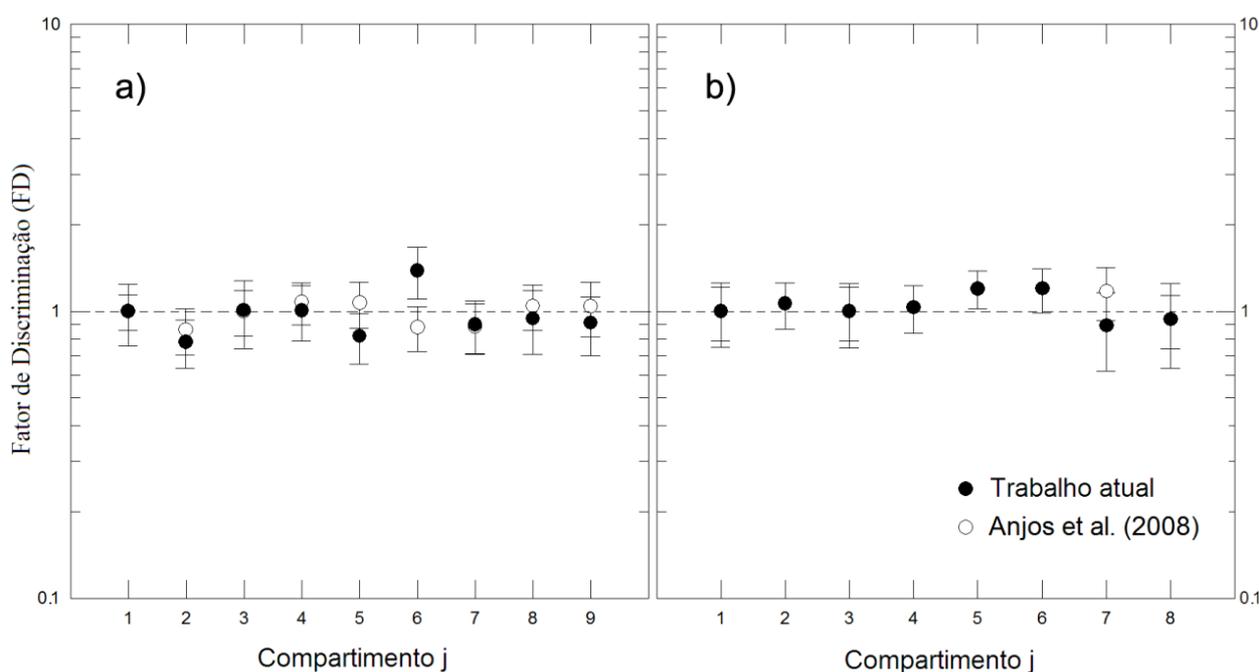


Figura 4.27: Fator de Discriminação (FD) em função do compartimento j para: a) as goiabeiras contaminadas e b) a mangueira contaminada MC, em um trabalho anterior e nesse trabalho. $J=1$ representa o tronco principal, $j=2$ as cascas, $j=3$ são galhos, $j=4$ galhos jovens, $j=5$ brotos, $j=6$ folhas velhas, $j=7$ folhas jovens, $j=8$ frutos verdes e $j=9$ frutos maduros.

Entretanto, mesmo com essas mudanças nos valores de FC e condições do solo, os valores de DR para as duas plantas convergiram para 1, mostrando que essa ferramenta pode ser muito eficiente em avaliar o quanto o potássio pode ser rastreado pelo ^{137}Cs .

Capítulo 5

Conclusões

Foram analisadas as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K no interior de cinco espécies de plantas tropicais: mandiocqueira (*Manihot esculenta*), bananeira (*Musa paradisiaca*), mamoeiro (*Carica papaya*), goiabeira (*Psidium guajava*) e mangueira (*Mangifera indica*). Os resultados mostraram que esses elementos possuem grande facilidade em ser absorvidos pelas raízes das plantas, sendo então, transportados para o interior de seus compartimentos.

A distribuição longitudinal de ^{40}K mostrou que este elemento comporta-se de forma semelhante tanto em plantas contaminadas por ^{137}Cs quanto em plantas que foram cultivadas sem a presença deste radionuclídeo no solo, indicando que o ^{137}Cs não interferiu de forma significativa na absorção e transporte de potássio no interior desses vegetais tropicais.

A distribuição bidimensional em cortes transversais do caule principal mostrou-se ser mais interessante na interpretação dos dados provenientes dos anéis de crescimento presentes no caule principal que as análises radiais tradicionais realizadas por outros trabalhos observados na literatura, uma vez que foi possível observar efeitos de assimetria e heterogeneidade nas distribuições de ^{137}Cs e ^{40}K nos discos de bananeiras e mamoeiros contaminados por césio. Contudo, foi possível observar que estes elementos apresentaram comportamentos semelhantes pelos anéis de crescimento.

Em relação aos demais órgãos ou compartimentos das plantas foi observado que o césio e o potássio mantiveram padrões semelhantes de acúmulo. Entretanto, notou-se que este padrão sofre alterações dependendo da espécie da planta estudada. Por

exemplo, os valores de concentração de ^{137}Cs e ^{40}K mostraram ser maiores nos compartimentos de crescimento das árvores lenhosas (mandioqueiras, goiabeiras e mangueira). Diferentemente, as plantas herbáceas (bananeiras e mamoeiros) mostraram uma diminuição na concentração destes elementos nas partes mais jovens das plantas, quando comparado com os valores de concentrações observados no interior do caule principal.

Os fatores de concentração (FC) mostraram ser ferramentas importantes neste tipo de investigação. A partir deles, foi possível observar com maior clareza as distribuições de césio e potássio ao longo dos grupos de vegetais estudados. Permitindo, inclusive, observar que o césio não produziu alterações significativas no transporte e distribuição de potássio nestas plantas tropicais.

Por outro lado, foi possível observar que alterações nas propriedades básicas do solo (tais como pH e umidade), podem produzir alterações significativas nas distribuições de ^{137}Cs e ^{40}K . Este comportamento foi observado em uma goiabeira e uma mangueira, que foram analisadas antes e após o local em que elas estavam sendo cultivadas ter sido concretado, ou em plantas que foram cultivadas no mesmo local, mas com condições diferentes das propriedades do solo. Entretanto, por mais que os valores de FC possam sofrer influência e variações causadas por fatores externos, os valores do fator de discriminação K/Cs (FD) mostraram-se sempre próximos a unidade para todas as espécies analisadas nesse trabalho. Este resultado confirmou uma importante hipótese de que o césio pode ser utilizado com traçador do transporte e acúmulo de íons de potássio em vegetais tropicais.

Este ponto é cientificamente relevante em áreas multidisciplinares, uma vez que sugere o uso de césio para prever o comportamento de outros cátions monovalentes inorgânicos em espécies tropicais. Por exemplo, algumas plantas possuem a facilidade

de substituir consideráveis porções de potássio por sódio, produzindo um efeito estimulante em seu crescimento, o qual não pode ser atingido apenas pelo aumento da concentração de potássio. O estímulo do crescimento via introdução de sódio é causando principalmente por efeitos na expansão celular e pelo balanço na absorção de água pela planta. Tal observação sugere que o céσιο poderia, então, também ser utilizado para traçar a nutrição de sódio pela planta. Assim, uma análise sobre as correlações entre os comportamentos de céσιο e sódio em plantas tropicais está entre nossos planos futuros.

Referências Bibliográficas

[Anjos et al., 2002] Anjos, R.M., Umisedo, N.K., Facure, A., Yoshimura, E.M., Gomes, P.R.S., Okuno, E., 2002. *Goiânia: 12 years after the ^{137}Cs Radiological Accident*. Radiation Protection Dosimetry 101(1-4), 201-204.

[Anjos et al., 2004] Anjos, R.M., Okuno, E., Yoshimura, E.M., Gomes, P.R.S., Estellita, L., Mangia, L., Uzeda, D., Soares, T., Facure, A., Brage, J.A.P., Mosquera, B., Carvalho, C., Santos, A.M.A., 2004. *Radioecology teaching: evaluation of the background radiation levels from areas with high concentrations of radionuclides in soil*. European Journal of Physics 25, 133-144.

[Anjos et al., 2005] Anjos, R.M., Veiga, R., Soares, T., Santos, A.M.A., Aguiar, J.G., Frascá, M.H.B.O., Brage, J.A.P., Uzêda, D., Mangia, L., Facure, A., Mosquera, B., Carvalho, C., Gomes, P.R.S., 2005, *Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites*. Radiation Measurements 39, 245-253.

[Anjos et al., 2007] Anjos, R.M., Mosquera, B., Carvalho, C., Sanches, N., Bastos, J., Gomes, P.R.S., Macário, K., 2007. *Accumulation and long-term decline of radiocaesium contamination in tropical fruit trees*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580, 625–628.

[Anjos et al., 2008] Anjos, R.M., Mosquera, B., Sanches, N., Cambuí, C. A., Mercier, H., 2008. *Caesium, potassium and ammonium distributions in different organs of tropical plants*. Aceito para publicação em Environmental and Experimental Botany.

[Antonopoulos-Domis et al., 1990] Antonopoulos-Domis, M., Clouvas, A., Gagianas, A., 1990. *Compartment model for long-term contamination prediction in deciduous fruit trees after a nuclear accident*. Health Physics 58, 737-741.

[Ávila, 1998] Ávila, R., Moberg, L., Hubbard, L., 1998. *Modelling of radionuclide migration in forest ecosystems*. A literature review. Swedish Radiation Protection Institute. SSI Report 98:07.

[Bell & Shaw, 2005] Bell, J.N.B., Shaw, G., 2005. *Ecological lessons from the Chernobyl accident*. Environment International 31, 771-777.

[Belli et al., 1995] Belli, M.; Sansone, U.; Ardiani, R.; Feoli, E. and Scimone, M., 1995. *The effect of fertiliser applications on ¹³⁷Cs uptake by different plant species and vegetation types*. Journal of Environmental Radioactivity 27, 75-89.

[Bystrzejewska-Piotrowska & Urban, 2004] Bystrzejewska-Piotrowska, G., Urban, P. L., 2004. *Accumulation and translocation of cesium-137 in onion plants (*Allium cepa*)*. Environmental and Experimental Botany 51, 3-7.

[**Carini, 2001**] Carini, F., 2001. *Radionuclide transfer from soil to fruit*. *Journal of Environmental Radioactivity* 52, 237-279.

[**Carvalho et al., 2006**] Carvalho C., Anjos R. M., Mosquera B., Macario K., Veiga R., 2006. *Radiocesium contamination behavior and its effect on potassium absorption in tropical or subtropical plants*. *Journal of Environmental Radioactivity* 86, 241-250.

[**Ciuffo et al., 2002**] Ciuffo, L. E. C., Belli, M., Pasquale, A., Menegon, S., Velasco H. R., 2002. *^{137}Cs and ^{40}K soil-to-plant relationship in a seminatural grassland of the Giulia Alps, Italy*. *The Science of The Total Environment* 295, 69-80.

[**Denham, 2007**] Denham, T. P., Haberle, S. G., Lentfer, C., Fullagar, R., Field, J. Therin, M., Porch, N., Winsborough. B., 2007. *Origins of Agriculture at Kuk Swamp in the Highlands of New Guinea*. Scienceexpres. Research Article. 3 de maio de 2007.

[**Djingova & Kuleff, 2002**] Djingova, R., Kuleff, I., 2002. *Concentration of caesium-137, cobalt-60 and potassium-40 in some wild and edible plants around the nuclear power plant in Bulgaria*. *Journal of Environmental Radioactivity* 59, 61–73.

[**EMBRAPA, 2007**] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

<<http://www.cnpmf.embrapa.br>> Acessado em setembro de 2007.

[Epstein et al., 1963] Epstein, E., Rains, D. W., Elzam, O. E., 1963. *Resolution of dual mechanisms of potassium absorption by barley roots*. Proceedings of National Academy of Science 49, 684-92.

[Facure et al., 2001a] Facure, A.; Umisedo, N.K.; Okuno, E.; Yoshimura, E.M.; Gomes, P.R.S.; Anjos, R.M., 2001. *Measurements performed in Goiânia after a new intervention action in 2001*. Radiation Protection Dosimetry 98(4), 433-435.

[Facure et al., 2001b] Facure, A., Umisedo, N.K., Okuno, E., Yoshimura, E.M., Gomes, P.R.S., Anjos, R.M., 2001. *Remains of ^{137}Cs contamination in the city of Goiânia, Brazil*. Radiation Protection Dosimetry 95(2), 165-171.

[Facure, 2001c] Facure, A., 2001. *A Contaminação Radiológica Remanescente em Goiânia*. Dissertação de Mestrado. IF-UFF.

[Fogh & Anderson, 2001] Fogh, C.L., Anderson, K.G., 2001. *Dynamic behaviour of ^{137}Cs contamination in trees of the Briansk region, Russia*. The Science of the Total Environment 269, 105-115.

[Gommers *et al.* 2000] Gommers, A., Thiry, Y., Vandenhove, H., Vandecasteele, C.M., Smolders, E., Merckx, R., 2000. *Radiocaesium Uptake by One-Year-Old Willows Planted as Short Rotation Coppice*. Journal of Environmental Quality 29, 1384-1390.

[Haas & Müller, 1995] Haas, G., Müller, A., 1995. *Radioecological Investigations on the Tree Rings Spruce*. The Science of Total Environment 173-174, 393-397.

[HASL, 1997] Environmental Measurements Laboratory, 1997. *HASL 300 – Procedures Manual*. 28th Edition, U.S. Department of Energy.

[Hsiao & Läunchli, 1986] Hsiao, T. C., Lauchli, A., 1986. *Role of potassium in plant-water relations*. Advanced Plant Nutrition 2, 281–312.

[IAEA, 1988] International Atomic Energy Agency. *The Radiological Accident in Goiânia*. Vienna.

[IAEA, 1989] International Atomic Energy Agency, 1989. *Measurement of Radionuclides in Food and the Environment*. Vienna: IAEA Technical Report Series, N° 295, 22-31.

[IAEA, 1994] International Atomic Energy Agency, 1994. *Handbook of parameter value for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments*. Vienna: IAEA Technical Report Series, N° 364.

[**Jones et al., 1991**] Jones, H.E.; Harrison, A.; Positt, A.F. and Clint, G., 1991. *The effect of potassium nutrition on Cs-137 uptake in two upland species*. Journal of Environmental Radioactivity 14, 279-294.

[**Knatko et al., 2000**] Knatko, V. A., Ageets, V. U., Shmigelskaya, I. V., Ivashkevich, I. I., 2000. *Soil-to-plant transfer of 137Cs deposition and soil characteristics*. Journal of Environmental Radioactivity, 48, 171–181.

[**Knoll, 1979**] Knoll, G.F., 1979. *Radiation Detection and Measurement*. New York: John Wiley and Sons.

[**Kosmidis et al., 2004**] Kosmas Kosmidis, Vangelis Karalis, Panos Argyrakis, Panos Macherasy, 2004. *Michaelis-Menten Kinetics under Spatially Constrained Conditions: Application to Mibefradil Pharmacokinetics*. Biophysical Journal 87, 1498–1506.

[**Kudo et al., 1993**] Kudo, A., Suzuki, T., Santry, D. C., Mahara, Y., Miyahara, S., Garrec, J. P., 1993. *Effectiveness of tree rings for recording Pu history at Nagasaki, Japan*. Journal of Environmental Radioactivity 21, 55-63.

[**Lambers et al., 1998**] Lambers, H., Chapin III, F.S., Pons, T.L., 1998. *Plant Physiological Ecology*. Springer, New York.

[Lederer & Shirley, 1978] Lederer, C.M., Shirley, V.S., 1978. *Table of Isotopes, 7th Edition*. New York: John Wiley and Sons.

[Livens & Loveland, 1988] Livens, F.R., Loveland, J.P., 1988. *The Influence of Soil Properties on the Environmental Mobility of Caesium in Cumbria*. *Soil Use and Management* 4(3) 69-75.

[Manica, 1998] MANICA, I., 1998. *Banana: do plantio ao amadurecimento*. Porto Alegre: Cinco Continentes Editora Ltda, 99p.

[Marschner, 1995] MARSCHNER, H., 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. London, Academic Press, 889p.

[Mc Gee *et al.*, 2000] McGee E.J., Synnott H.J., Johanson K.J., Fawaris B.H., Nielsen S.P., Horrill A.D., Kennedy, V.H., Barbayiannis, N., Veresoglou, D.S., Dawson, D.E., Colgan, P.A., McGarry, A.T., 2000. Chernobyl fallout in a Swedish spruce forest ecosystem. *Journal of Environmental Radioactivity* 48, 59-78.

[Mitchell, 2001] Mitchell, N.G., 2001. *Models for radionuclide transfer to fruits and data requirements*. *Journal Environmental Radioactivity* 52, 291–307.

[Momoshima & Bondietti, 1994] Momoshima, M., Bondietti E.A., 1994. *The radial distribution of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in trees*. *Journal of Environmental Radioactivity* 22, 93-109.

[Mosquera *et al.*, 2006] Mosquera, B., Carvalho, C., Veiga, R., Mangia, L., Anjos, R.M., 2006. ¹³⁷Cs Distribution in Tropical Fruit Trees After Soil Contamination. *Environmental and Experimental Botany* 55, 273-281.

[Morton, 1987] Morton, J., 1987. *Fruits of warm climates*. Julia F. Morton, Miami, FL.

[Myttenaere *et al.*, 1993] Myttenaere, C., Schell, W. R., Thiry, Y., Sombre, L., Ronneau, C., Schrieck, J., 1993. *Modelling of Cs-137 cycling in forests: recent developments and research needed*. *The Science of Total Environment* 136, 77-91.

[ORTEC, 1984] EG&G ORTEC, 1984. *Experiments in Nuclear Science AN34*, Laboratory Manual. Tennessee: EG&G ORTEC.

[Papastefanou *et al.*, 1999] Papastefanou, C.; Manolopoulou, M.; Stoulos, S.; Ioannidou, A., Gerasopoulos, E., 1999. *Soil-to-plant transfer of 137Cs, 40K and 7Be*. *Journal of Environmental Radioactivity* 45, 59-65.

[Regan, 1997] Regan, P.H., 1997. *2nd Year Radiation Detection and Measurement*, Lecture Notes.

[RHH, 1970] Radiological Health Handbook, 1970. *Bureau of Radiological Health, US Dept. of Health, Education and Welfare*. Revised Edition, US Government Printing O-cc. Washington, DC.

[Ribas, 2002] Ribas, Roberto V., 2002. *Instrumentação Nuclear*. São Paulo: IF-USP.

[Salomão *et al.*, 2006] Luiz Carlos Chamhum Salomão, Dalmo Lopes de Siqueira, Márcio Eduardo Canto Pereira, 2006. *Acúmulo de macro e micronutrientes nas folhas e caules do ramo produtivo da lichieira bengal durante um ano*. Revista Ciência e Agrotecnologia, Lavras 30, nº 1, 9-14.

[Salt & Kay, 1999] Salt, C.A., Kay, J.W., 1999. *The seasonal pattern of radiocaesium partitioning within swards of *Agrostis capillaris* at two defoliation intensities*. Journal Environmental Radioactivity 45, 219-34.

[Savidis, 1988] Savidis, T., 1988. *Uptake of radionuclides by plants after the Chernobyl accident*. Environmental Pollution 50, 317-324.

[Savidis, Drossos, & Heinrich, 1990] Savidis, T., Drossos, E., Heinrich, G., 1990. *¹³⁷Cs accumulation in higher plants before and after Chernobyl*. Environment International 16, 165-169.

[Schachtman & Schroeder, 1994] Schachtman, D.P., Shroeder, J.I., 1994. *Structure and transport mechanism of a high-affinity potassium uptake transporter from higher plants*. Nature 370, 655-658.

[Schachtman *et al.*, 1992] Schachtman, D.P.; Shroeder, J.I.; Lucas, W.J.; Anderson, J.A.

and Gaber, R.F., 1992. *Expression of an Inward-Rectifying Potassium Channel by the Arabidopsis KATI cDNA*. Science 258, 1654-1658.

[Shaw & Bell, 1989] Shaw, G. and Bell, J.N.B., 1989. *The kinetics of caesium absorption by roots of winter wheat and the possible consequences for the derivation of soil-to plant transfer factors for radiocaesium*. Journal of Environmental Radioactivity 10, 213-231.

[Shaw & Bell, 1991] Shaw, G. and Bell, J.N.B., 1991. *Competitive Effects of Potassium and Ammonium on Caesium Uptake Kinetics in Wheat*. Journal of Environmental Radioactivity 13, 283-296.

[Shaw *et al.*, 1992] Shaw, G.; Hewamanna, R.; Lillywhite, J. and Bell, J. N. B., 1992 *Radiocaesium Uptake and Translocation in Wheat with Reference to the Transfer Factor Concept and Ion Competition Effects*. Journal of Environmental Radioactivity 16, 167-180.

[Shultz, 1965] Shultz, R. K., 1965. *Soil Chemistry of Radionuclides*. Health Physics 11, 1317-1324.

[Simon *et al.*, 2002] Simon, S. L.; Graham, J. C. and Terp, S. D., 2002. *Uptake of ⁴⁰K and ¹³⁷Cs in native plants of the Marshall Islands*. Journal of Environmental Radioactivity 59, 223-243.

[Smolders *et al.*, 1996] Smolders, E.; Kiebooms, L.; Buysse, J. and Merckx, R., 1996. ¹³⁷Cs uptake in spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Tonic) at varying K supply. Plant Soil 181, 205-220.

[Tyson *et al.*, 1999] Tyson, M.J., Sheffield, E., Callaghan, T.V., 1999. Uptake, transport and seasonal recycling of ¹³⁴Cs applied experimentally to bracken (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn). Journal Environmental Radioactivity 46, 1-14.

[White & Broadley, 2000] White, P.J., Broadley, M.R., 2000. Mechanisms of caesium uptake by plants. New Phytology 147, 241-256.

[Zhu, 1998] Zhu, Y-G., 1998. Effect of potassium supply on the uptake of Radiocaesium by crops. Ph.D. thesis, The University of London, UK.

[Zhu & Smolders, 2000] Zhu, Y-G., Smolders, E., 2000. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. Journal of Experimental Botany, 51 (351), 1635-1645.

[Zhu *et al.*, 2000] Zhu, Y-G.; Shaw, G.; Nisbet, A. F. and Wilkins, B. T., 2000. Effect of potassium starvation on the uptake of radiocaesium by spring wheat (*Triticum aestivum* cv. Tonic). Plant and Soil 220, 27-34.

[Zhu *et al.*, 2002] Zhu, Y-G.; Shaw, G.; Nisbet, A. F. and Wilkins, B. T., 2002. *Effect of external potassium supply and plant age on the uptake of radiocaesium ¹³⁷Cs by broad bean (Vicia faba): interpretation of results from large-scale hydroponic study.* Environmental and Experimental Botany 47, 173-187.

*"Otimista é o homem que faz palavras cruzadas a tinta."
(Marcel Achard)*