

UFF- UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Alberto Silva Cid

Evolução Temporal da Incorporação de $^{137}\text{Cs}^+$, K^+ e Na^+ em
Plantas Frutíferas Tropicais e suas Correlações com a
Fisiologia Vegetal

*Dissertação apresentada ao
curso de Pós- Graduação em
Física da Universidade Federal
Fluminense, como pré-requisito
para obtenção do Grau de
Mestre em Física.*

Orientador: Roberto Meigikos dos Anjos

Niterói - Rio de Janeiro

2011



INSTITUTO DE FÍSICA

Universidade Federal Fluminense

Evolução Temporal da Incorporação de $^{137}\text{Cs}^+$, K^+ e Na^+ em
Plantas Frutíferas Tropicais e suas Correlações com a
Fisiologia Vegetal

C568 Cid, Alberto Silva

Evolução temporal da incorporação de $^{137}\text{Cs}^+$, K^+ e Na^+ em plantas frutíferas tropicais e suas correlações com a fisiologia vegetal / Alberto Silva Cid ; orientador: Roberto Meigikos dos Anjos. -- Niterói, 2011.
78 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense.
Instituto de Física, 2011.

Bibliografia: f. 74-78.

Sumário

Capítulo 1	1
<i>Introdução</i>	1
Capítulo 2	6
<i>Materiais e Métodos</i>	6
2.1. Coleta e preparo das amostras	6
2.2. Técnicas experimentais	10
2.2.1. Ativação Neutrônica	11
2.2.2. Espectrometria gama	12
2.2.3. Detectores HPGe e suas principais características.....	16
2.2.3.1. Resolução em energia	16
2.2.3.2. Calibração em energia	17
2.2.3.3. Eficiência de detecção	17
2.2.3.4. Limite inferior de detecção	22
2.3. Análise dos Dados	24
2.3.1. Amostras Padrão	24
2.3.2. Determinação das concentrações de atividade via espectrometria gama.....	25
2.3.3. Determinação das concentrações de atividade via NAA.....	27
Capítulo 3	30
<i>Fundamentação de Conceitos e Modelos</i>	30
3.1. Descrição das espécies estudadas	30
3.1.1. Limoeiro	30
3.1.2. Coqueiro	31
3.2. Nutrientes vegetais	32
3.2.1. Potássio.....	33
3.2.2. Sódio.....	34
3.3. Composição do Solo	35
3.4. Propriedades do Solo	36
3.5. Transporte e Absorção de Nutrientes	38
3.6. Distribuição de $^{137}\text{Cs}^+$, K^+ , and NH_4^+ nas plantas.....	41

3.7. Modelo para a incorporação de K^+ , $^{137}Cs^+$ e Na^+ em frutos	46
3.7.1. Modelo para a curva de crescimento dos frutos	48
3.7.2. Modelo para a incorporação de K^+ , Na^+ e $^{137}Cs^+$	49
3.8. Fator de transferência solo-planta	50
Capítulo 4	52
<i>Resultados</i>	52
4.1. Cátions monovalentes em limões	53
4.2. Cátions monovalentes em cocos	60
4.3. Fator de Transferência solo-fruto	67
Capítulo 5	71
<i>Conclusões</i>	71
<i>Referências</i>	74

Lista de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1: Estágios de desenvolvimento dos frutos de limoeiros.....9

Figura 2.2: Etapas da preparação das amostras. 1º) medição das dimensões dos frutos; 2º) pesagem dos frutos verdes em uma balança de alta precisão; 3º) secagem na estufa a uma temperatura de 100° C; 4º) pesagem dos frutos secos; 5º) trituração; 6º) peneiramento; 7º) acondicionamento em potes cilíndricos.9

Figura 2.3: Reator IAEA-R1 do IPEN.....12

Figura 2.4: Imagens da blindagem de chumbo e do detector de HPGe utilizado no LARA.14

Figura 2.5: Espectros de energia para emissões gama típicos das medidas realizadas no LARA. a) espectro de radiação de fundo; b) espectro para uma amostra de fruto não contaminado por ¹³⁷Cs.....15

Figura 2.6: Esquema de decaimento do ⁴⁰K (Heath, 1964).....15

Figura 2.7: Ilustração de uma reta de calibração em energia gama obtida em nosso trabalho18

Figura 2.8: Espectro de energia da amostra IAEA 375- soil.20

Figura 2.9: Esquema de decaimento do ¹³⁷Cs (Heath,1964).....20

Figura 2.10: Curvas de eficiência típica dos detectores da Canberra (Canberra,2003).....21

Figura 2.11: Ilustração de uma curva de eficiência obtida para um detector HPGe do LARA, utilizando o material de referência IAEA – 375- soil. A linha cinza representa a curva $\ln(\text{Eficiência}) = -0.648 \ln(E) + 0.353$, $R^2=0.99$21

Figura 2.12: Ilustração da sobreposição das distribuições da taxa de contagem do fundo e da amostra no cálculo do Limite Inferior de Detecção (LID).22

Figura 2.13: Espectro de energia típico obtido após a ativação de uma amostra de limão. O espectro vermelho é representa a radiação de fundo enquanto o preto é da amostra de limão.....28

Figura 2.14: Esquema de decaimento do ^{42}K (Heath, 1964).....29

Figura 2.15: Esquema de decaimento do ^{24}Na (Heath,1964).....29

Capítulo 3

Figura 3.1: Esquema do transporte de nutrientes via modo canal e transportador(Taiz, 2004).....41

Figura 3.2 Curva sigmóide para o crescimento de frutos (Pallardy, 2008).47

Capítulo 4

Figura 4.1: Curva de crescimento para limões. A curva vermelha representa um ajuste utilizando-se a Equação (3.3), com $R^2=0.97$. A Legenda apresenta os valores dos parâmetros ajustados.56

Figura 4.2: Evolução temporal da concentração de sódio e potássio nos limões.57

Figura 4.3: Evolução temporal da concentração de céσιο em limões.58

Figura 4.4: Evolução temporal da incorporação de potássio e céσιο em limões. A curva vermelha representa o ajuste realizado por nosso Modelo (Equação 3.4) e a legenda representa os principais parâmetros obtidos a partir deste ajuste.59

Figura 4.5: Evolução temporal da incorporação da quantidade de potássio e céσιο em limões. A curva vermelha representa a aplicação da Equação (3.6).60

Figura 4.6: Concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K em função do tamanho das folhas de coqueiros cultivados em Biquini (Robison et al., 2009).....63

Figura 4. 7: Curva de crescimento para cocos. A curva verde representa um ajuste utilizando-se a Equação (3.1), com $R^2=0.99$. A Legenda apresenta os valores dos parâmetros ajustados.64

Figura 4. 8: Evolução temporal dos elementos sódio e potássio para cocos.65

Figura 4.9: Evolução temporal da incorporação de potássio e sódio em cocos. A curva verde representa o ajuste realizado por nosso Modelo (Equação 3.4) e a legenda representa os principais parâmetros obtidos a partir deste ajuste.65

Figura 4. 10: Curva de absorção de potássio e sódio para cocos.66

Figura 4.11: Fator de transferência para o potássio e o cézio em limões. A curva representa um ajuste de nosso modelo utilizando as Equações (4.8) e (4.5).69

Lista de Tabelas

Capítulo 2

2.1. Elementos presentes no material de referencia IAEA-375-soil utilizados para a construção da curva de eficiência do Detector HPGe do LARA..... 19

2.2. Dados referentes a uma determinada emissão gama ao transpassar um meio absorvedor. 25

Capítulo 3

3.1. Propriedades dos solos estudados neste trabalho.....38

3.2. Valores médios das concentrações de ^{137}Cs , ^{40}K e NH_4^+ e seus respectivos valores de (CR) para diversos compartimentos j de laranjeiras contaminadas por ^{137}Cs , extraídos de Anjos et al. (2009). O valor em parênteses representa o desvio padrão.....45

3.3. Valores médios das concentrações de ^{137}Cs , ^{40}K e NH_4^+ e seus respectivos valores de (CR) para diversos compartimentos j de goiabeiras contaminadas por ^{137}Cs , extraídos de Anjos et al. (2009). O valor em parênteses representa o desvio padrão.....46

Capítulo 4

4.1. Dados experimentais dos limões não contaminados por ^{137}Cs medidos NAA53

4.2. Dados experimentais dos limões contaminados por ^{137}Cs medidos por espectrometria gama.....54

4.3. Dados experimentais dos cocos.....61

Agradecimentos

Dedico esse espaço a todos àqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a minha formação humana e profissional e na concretização deste mestrado. Em especial, gostaria de expressar meus agradecimentos:

Primeiramente a Deus, porque nele nos movemos, somos e vivemos.

Aos meus pais Alberto e Inácia, pelo amor e dedicação.

À minha versão feminina, Gabriela.

À minha avó Elisa e tia Linda, por tudo.

Aos meus avós Maria de Lourdes e José Quirino.

Ao meu orientador Prof. Dr. Roberto Meigikos dos Anjos, pelo apoio nesse trabalho e por contribuir para a minha formação como pesquisador.

À Prof^a. Dra. Kita Macario, por ter me inserido no LARA.

À Dra. Cibele Bugno Zamboni do IPEN, quem proporcionou a realização das medidas por ativação neutrônica.

Ao Dr. Hugo Velasco, Dr. Marcos Rizzoto e Dra. Jimena Ayub da Universidad de San Luis, pela colaboração com a interpretação dos dados e no desenvolvimento do Modelo Teórico.

Ao Jorge, motorista da UFF, quem sempre me levou aos locais de coleta de amostras.

A todos os amigos.

Ao pessoal da biblioteca.

Àqueles professores que me fizeram amar o conhecimento.

Ao Renan e Eduardo, que algumas vezes me ajudaram na coleta e preparação de amostras.

A todos os meus alunos particulares.

À Yngrid, pelo carinho.

Àquelas pessoas que fizeram parte da minha vida, mas já cumpriram a sua jornada.

Ao Instituto de Física e sua Pós-Graduação e ao LARA, que me deram a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho.

Finalmente, ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Resumo

Concentrações de ^{137}Cs , K e Na em frutos de limões (*Citrus limon B.*) e de K e Na em frutos de cocos (*Cocos Nucifera L.*) foram medidas por espectrometria gama e ativação neutrônica a fim de entender o comportamento de cátions inorgânicos monovalentes em plantas tropicais tão bem quanto a capacidade das plantas em armazenar esses elementos. Ao contrário do K e do Na, cézio não é um elemento essencial para as plantas. Entretanto nossos resultados tem mostrado que a incorporação de ^{137}Cs por tecidos vegetais é positivamente correlacionada com a distribuição de K no interior das plantas tropicais estudadas, sugerindo que esses dois elementos são assimilados de forma semelhante e que passam através do ciclo biológico juntos. Não obstante a correlação entre ^{137}Cs e Na é fortemente dependente das espécies de plantas. Um modelo matemático simples é também proposto para descrever a evolução temporal da incorporação de cátions monovalentes inorgânicos pelos frutos de espécies tropicais. O modelo apresentou boa concordância com os resultados experimentais ao longo do desenvolvimento dos frutos.

Palavras Chave: ^{137}Cs , K, Na, *Citrus limon B.*, *Cocos nucifera L.*, *Espectrometria Gama*, *Ativação Neutrônica*.

Abstract

Concentrations of ^{137}Cs , K and Na in fruits of lemon (*Citrus limon B.*) and of K and Na in fruits of coconut (*Cocos nucifera L.*) were measured by both gamma spectrometry and neutron activation analysis, with the aim to understand the behaviour of monovalent inorganic cations in tropical plants as well as the plant ability to store these elements. In contrast to K and Na, Cs is not an essential element to plants. However, our results have shown that ^{137}Cs incorporation to vegetal tissues is positively correlated to K distribution inside the tropical plant species studied, suggesting that these two elements might be assimilated in a similar way, and that they pass through the biological cycle together. Nevertheless correlation between ^{137}Cs and Na is strongly dependent on plant species. A simple mathematical model is also proposed to describe the temporal evolution in the incorporation of monovalent inorganic cations by the fruits of such tropical species. This model exhibited close agreement with the experimental results along the fruit development.

Keywords: ^{137}Cs , K, Na, *Citrus limon B.*, *Cocos nucifera L.*, *Gamma Spectrometry*, *Neutron Activation Analysis*.

Capítulo 1

Introdução

Elementos radioativos antrópicos originados de produtos de fissão nuclear têm sido injetados no meio ambiente a partir de testes de armamentos, descargas de rejeitos nucleares e acidentes produzidos em centrais nucleares. Dentre estes radionuclídeos o ^{137}Cs é um dos principais elementos estudado, uma vez que persiste por longos períodos na biosfera devido sua meia-vida de 30,2 anos.

Segundo estudos da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1998), a liberação de radionuclídeos antrópicos para a estratosfera iniciou-se entre as décadas de 50 e 70, sendo que o ^{137}Cs foi distribuído globalmente antes de ser depositado na superfície do planeta. Sua deposição foi associada principalmente com a precipitação atmosférica (chuva, neve e deposição seca). A distribuição espacial de sua precipitação radioativa (*fallout*) foi determinada primariamente em função da localização da ocorrência do uso de armas nucleares, pelo padrão da circulação estratosférica e pela quantidade de precipitação atmosférica anual. Desta forma, pode-se dizer que houve uma nítida demarcação latitudinal, de tal forma que a precipitação radioativa total do ^{137}Cs no hemisfério norte foi substancialmente maior do que no hemisfério sul. O padrão global do *fallout* de ^{137}Cs proveniente do uso de armas nucleares indica que sua concentração no solo varia entre 160 e 3200 Bq/m², dependendo da latitude. Por outro lado, a precipitação radioativa de ^{137}Cs proveniente do acidente de Chernobyl em 1986, o qual afetou várias áreas da Europa, aumentou em alguns locais os inventários já existentes em várias ordens de magnitude. Na região central da Rússia, por exemplo, os inventários de ^{137}Cs atingiram 500 kBq/m² após o acidente de Chernobyl (IAEA, 1998). Atualmente, o padrão global da precipitação radioativa do

^{137}Cs deve sofrer algumas mudanças devido ao acidente ocorrido recentemente em Fukushima, principalmente ao redor do Japão.

Uma vez precipitado no solo, o ^{137}Cs é encontrado na forma iônica, tendendo a permanecer nas camadas superiores do solo, uma vez que possui grande facilidade de se fixar aos minerais argilosos e matéria orgânica. Desta forma, ele pode permanecer por longos períodos de tempo na zona radicular das plantas. Como seu tamanho e comportamento químico são similares a alguns nutrientes minerais, que também são encontrados na forma de cátions inorgânicos monovalentes (tais como NH_4^+ , Na^+ e K^+), Cs^+ pode ser facilmente absorvido pelas raízes e translocado para as partes aéreas das plantas. Isto faz com que o ^{137}Cs ingresse na cadeia alimentar e se torne um objeto de estudo para a saúde humana (Anjos *et al.*, 2009).

Devido a este quadro, várias técnicas de Física Nuclear começaram a ser aplicadas a partir da década de 50 no desenvolvimento de trabalhos de proteção radiológica, visando à compreensão do impacto da liberação de substâncias ou rejeitos radioativos tanto no meio ambiente quanto na cadeia alimentar. Isto favoreceu o surgimento de uma área ou linha de pesquisa denominada de Radioecologia ou ecologia da radiação. Esta linha, considerada uma ciência multidisciplinar, visa à compreensão da influência de diferentes radioisótopos sobre os organismos vivos, ao mesmo tempo em que gera modelos sobre o acúmulo e a migração de radioisótopos na biosfera. Contudo, o conhecimento a respeito do ingresso, circulação e acúmulo de radioisótopos em diferentes partes que compõem um ecossistema também possibilita a caracterização de distintos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no meio ambiente. Assim, a radioecologia sofreu grande evolução nos últimos anos, uma vez que os mesmos resultados radiométricos observados podem ser analisados ou interpretados por diferentes pontos de vista, permitindo uma compreensão global da estrutura dos ecossistemas terrestres e as inter-relações com a evolução das espécies.

Tomando-se como um exemplo o estudo do ciclo biogeoquímico do ^{137}Cs em ecossistemas florestais e agrícolas, nota-se que medidas de sua concentração podem ser analisadas por diferentes caminhos. Do ponto de vista de proteção radiológica, a avaliação de contaminação radioativa de partes comestíveis de plantas é importante

para estimativas das taxas de doses associadas à liberação de radionuclídeos no meio ambiente e as consequências para o homem. Por outro lado, medidas de concentrações de ^{137}Cs em plantas também são interessantes do ponto de vista da fisiologia vegetal, já que o ^{137}Cs possui grande potencial para ser usado como um marcador fisiológico na avaliação do transporte e distribuição de macronutrientes em plantas, tais como o amônio, potássio e sódio.

Porém, até pouco tempo atrás, a grande maioria de estudos sobre ciclos biogeoquímicos do césio eram desenvolvidos no hemisfério norte em ecossistemas terrestres de clima temperado, devido ao acidente de Chernobyl e a maior incidência de testes ou uso de armas nucleares. No hemisfério sul, estes estudos eram escassos e começaram a ser realizados em plantas tropicais e subtropicais a partir dos anos 2000, sendo que as amostras de plantas são provenientes principalmente de regiões onde ocorreu o acidente radiológico com ^{137}Cs na cidade de Goiânia, em 1987 (IAEA, 1988). Estudos realizados por nosso Grupo (Carvalho *et al.*, 2006; Mosquera *et al.*, 2006, Sanches *et al.*, 2008, Anjos *et al.*, 2009a) em diversas plantas tropicais, tais como limoeiro (*Citruslimon B.*), laranjeira (*Citrussinensis*), goiabeira (*Psidiumguajava*), mangueira (*Mangifera indica*), pimenteira (*Capsicumfrutescens*), mamoeiro (*Caricapapaya*), bananeira (*Musa paradisiaca*) e mandioqueira (*Manihotesculenta*), têm demonstrado que os íons de césio apresentam grande mobilidade no interior das plantas e que o seu comportamento se assemelha muito à distribuição do potássio ao longo dos diferentes compartimentos ou órgãos das plantas, tais como raízes, troncos, galhos, folhas e frutos. Potássio é um nutriente vegetal relacionado diretamente com o crescimento das plantas. Adicionalmente, temos observado que as distribuições destes elementos mostram uma forte correlação com a espécie vegetal. Por exemplo, as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K são mais elevadas nas partes de crescimento (folhas, frutos, galhos jovens e casca) de plantas frutíferas lenhosas, enquanto que um comportamento inverso é observado em plantas herbáceas, onde as concentrações destes elementos são menores nestes mesmos compartimentos. Foi observada ainda uma competição na absorção desses elementos pelas plantas. Quanto mais ^{137}Cs for incorporado pelas plantas menor será a incorporação do K e vice-versa. Assim a presença do K inibe a absorção de ^{137}Cs .

Todo esse aprendizado possui diversas aplicações na linha de radioecologia, permitindo fornecer importantes procedimentos para acelerar a recuperação de ecossistemas florestais e agrícolas no caso da ocorrência de uma emergência radiológica ou nuclear. Isto permite evitar, em alguns casos, a devastação desnecessária do meio ambiente. Por outro lado, a continuidade deste estudo permite o desenvolvimento de modelos teóricos, baseado em sistemas de equações diferenciais solucionadas numericamente, onde o ^{137}Cs pode ser usado para aumentar o conhecimento do comportamento de cátions monovalentes inorgânicos (tais como, K^+ , Na^+ e NH_4^+) em plantas tropicais. Desta forma, nosso Grupo passou a investigar a relação de $^{137}\text{Cs}^+$ com estes macronutrientes vegetais. Este estudo possui grande aplicabilidade na área de fisiologia vegetal, uma vez que permite a compreensão da dinâmica da absorção e transporte de íons, bem como da evolução macroscópica de várias espécies de plantas tropicais e subtropicais.

Assim, o trabalho desenvolvido nesta dissertação de mestrado baseou-se no estudo do comportamento de nutrientes, que se apresentam no solo na forma de cátions monovalentes. Para tanto, foi estudado o comportamento de K^+ e Na^+ e suas correlações com $^{137}\text{Cs}^+$ ao longo do período de crescimento e maturação de frutos de plantas tropicais. Por ser um dos órgãos ou compartimentos mais jovens da planta, que tem demonstrado maiores valores de acúmulo de ^{137}Cs em plantas lenhosas e também de grande interesse comercial, decidimos fazer, assim, um estudo mais detalhado de sua incorporação neste compartimento, a fim de melhor correlacioná-lo com a distribuição de nutrientes vegetais. O compartimento fruto foi escolhido devido ao fato das concentrações de ^{137}Cs , Na e K no solo durante o período de crescimento dos frutos não sofrerem alterações significativas. Além disso, investigações que podem resultar na determinação de meios de estimular o crescimento de frutos é de grande interesse prático e científico.

Dentro deste contexto, decidimos averiguar como seria o comportamento simultâneo de $^{137}\text{Cs}^+$, Na^+ e K^+ em duas espécies de plantas, uma lenhosa e outra não lenhosa. Assim, foram escolhidos o limoeiro (*Citruslimon B.*) e coqueiro (*Cocos nucifera L.*). Além disso, os resultados experimentais foram usados de base para a construção

de um modelo teórico, que permita descrever a incorporação de nutrientes e substâncias radioativas durante o processo de frutificação de plantas tropicais.

O sódio foi escolhido como um novo elemento a ser estudado por ele possuir maiores concentrações em ambientes salinos. Em relação às mudanças climáticas, é importante conhecer o comportamento desse elemento, uma vez que o aumento do nível do mar, devido ao descongelamento de geleiras, provocará uma maior incorporação de sódio em plantas costeiras, tais como herbáceas e palmeiras. O sódio não é considerado um nutriente essencial e, por isso, é importante compreender como o aumento da concentração desse elemento pode prejudicar o desenvolvimento de plantas em ambientes costeiros.

Este trabalho possui a seguinte estrutura: o Capítulo 2 expõe o conhecimento técnico e a Física envolvida na determinação das concentrações. O Capítulo 3 expõe conceitos sobre transporte, incorporação e absorção de nutrientes pelas plantas para o auxílio na interpretação dos resultados. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados experimentais e no Capítulo 5 são feitas as conclusões desse trabalho.

Capítulo 2

Materiais e Métodos

Este trabalho envolveu a participação de três instituições de pesquisa. A preparação de amostras e análises utilizando a técnica de espectrometria gama foi realizada no Laboratório de Radioecologia (LARA) do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense. A análise por ativação de nêutrons foi realizada no reator de pesquisas IEA-R1 do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN). A interpretação e desenvolvimento de modelos foram realizados em parceria com o *Grupo de Estudios Ambientales* (GEA) da *Universidad Nacional de San Luis – UNSL* (San Luis, Argentina).

A fim de conhecer o comportamento dos cátions monovalentes $^{137}\text{Cs}^+$, K^+ e Na^+ nos frutos de plantas tropicais é necessário determinar a concentração destes elementos presentes nas amostras. Para garantir a acurácia e possibilitar a comparação dos resultados obtidos por laboratórios e/ou técnicas distintas é extremamente importante criar procedimentos rigorosos em todas as etapas desde a coleta até a análise dos resultados. Desta forma, este capítulo se propõe a apresentar e descrever o aparato experimental e os métodos utilizados na aquisição dos dados.

2.1. Coleta e preparo das amostras

A fim de estimar a incorporação de cátions inorgânicos monovalentes durante o processo de crescimento e maturação das partes comestíveis de plantas tropicais, foram estudadas as distribuições de $^{137}\text{Cs}^+$, K^+ e Na^+ nos frutos de limoeiros (*Citruslimon B.*) e coqueiros (*Cocos nucifera L.*) em função do tempo.

A coleta foi realizada no período compreendido entre março de 2009 e maio de 2010, em dois locais pertencentes ao estado do Rio de Janeiro, região Sudeste do Brasil (22° 56' 50" S, 43° 01' 23" W). Em Itaipu-Niterói, foram coletadas amostras de

cocos a partir de cinco árvores. Estas possuíam em média 10 m de altura e uma idade de 10 anos. Em Itaipuaçu, subdistrito de Maricá, foram coletadas amostras de limões a partir de três árvores. Estas possuíam cerca de 2,5 m de altura e idade de 5 anos. Os dois locais são bem próximos apesar de pertencerem a municípios distintos porque estão na região limítrofe comum às duas cidades.

As amostras de frutos de limoeiros não contaminados foram coletadas de quinze em quinze dias. Foram duas floradas: uma com início em março de 2009 e outra com início em setembro do mesmo ano. O tempo de crescimento e maturação de frutos é de aproximadamente seis meses. Em cada amostragem foram coletadas em média 5 frutos de cada árvore para cada período de seu crescimento. Na Figura 2.1 é possível observar a variação no tamanho dos limões coletados desde o período de brotamento até a sua completa maturação.

Quanto aos cocos, foram coletadas amostras para vários períodos de crescimento entre março e setembro de 2009, também respeitando um intervalo de tempo de 15 em 15 dias. Em média, foram coletadas 3 amostras de frutos para cada árvore.

O estudo da evolução temporal do ^{137}Cs foi realizada apenas no processo de maturação de limões, seguindo o mesmo procedimento de coleta mencionado acima. As amostras foram coletadas na cidade de Goiânia ($16^{\circ} 40' 14'' \text{ S}$, $49^{\circ} 16' 17'' \text{ W}$), região central do Brasil, a partir de uma única árvore disponível. Esta possuía cerca de 2,5 m de altura e idade de 7 anos. Goiânia foi escolhida pela disponibilidade de frutos contaminados com ^{137}Cs , devido ao grande acidente radiológico ocorrido no ano de 1987. Uma vez que não havia coqueiros nos locais do acidente, o comportamento do ^{137}Cs foi comparado com o comportamento apresentado pelas folhas de coqueiros coletadas nas Ilhas de Bikini (Ilhas Marshall, Micronésia), local onde foram realizados inúmeros testes nucleares nas décadas de 50 e 60 do século passado causando grande contaminação do solo com ^{137}Cs (Robinson *et al.*, 2009).

Durante a análise das concentrações de ^{137}Cs , também foram determinados alguns valores das concentrações de ^{40}K para frutos do limoeiro contaminados por ^{137}Cs . Os resultados mostraram o mesmo comportamento deste elemento para as

amostras coletadas em Itaipuaçu (região sem contaminação de ^{137}Cs). Assim, nós investimos esforços na determinação das curvas de crescimentos para potássio e sódio em plantas não contaminadas, uma vez que elas eram cultivadas próximo da UFF e, portanto, nos permitia um maior controle do processo de coleta das amostras.

Por fim, o solo, proveniente de uma área de enraizamento de cada planta, também foi amostrado. A coleta foi realizada utilizando-se um trado. A profundidade de enraizamento foi definida como sendo de 20 cm para as culturas agrícolas, seguindo o protocolo para a determinação experimental de fatores de transferência solo-planta (razão de concentrações) definido pela *International Union of Radioecology* (IUR) para ser usado em modelos de avaliação radiológica (IUR, 1992; Frissel, 1997).

O preparo das amostras foi realizado no Laboratório de Radioecologia da UFF. Para tanto, as amostras foram secas em uma estufa à temperatura de 100° C por 24 h, tempo necessário para que a massa atingisse um valor constante e pudesse se denominada de massa seca. Posteriormente, as amostras foram trituradas em um moinho analítico, peneiradas e acondicionadas em recipientes plásticos cilíndricos. (vide Figura 2.2). Neste estágio, as amostras estão prontas para a etapa de medição.

A etapa de secagem é importante, porque a taxa de crescimento dos frutos não é proporcional ao aumento da quantidade de água incorporada pelos frutos. Esse fato pode mascarar os valores reais de concentração e por isso é convencionado que a massa seja expressa em unidades de massa seca.

As amostras são trituradas e peneiradas a fim de ser obtida a sua homogeneização. Este procedimento é necessário para que medidas distintas de uma mesma amostra convirjam para um mesmo valor.



Figura 2. 1: Estágios de desenvolvimento dos frutos de limoeiros.

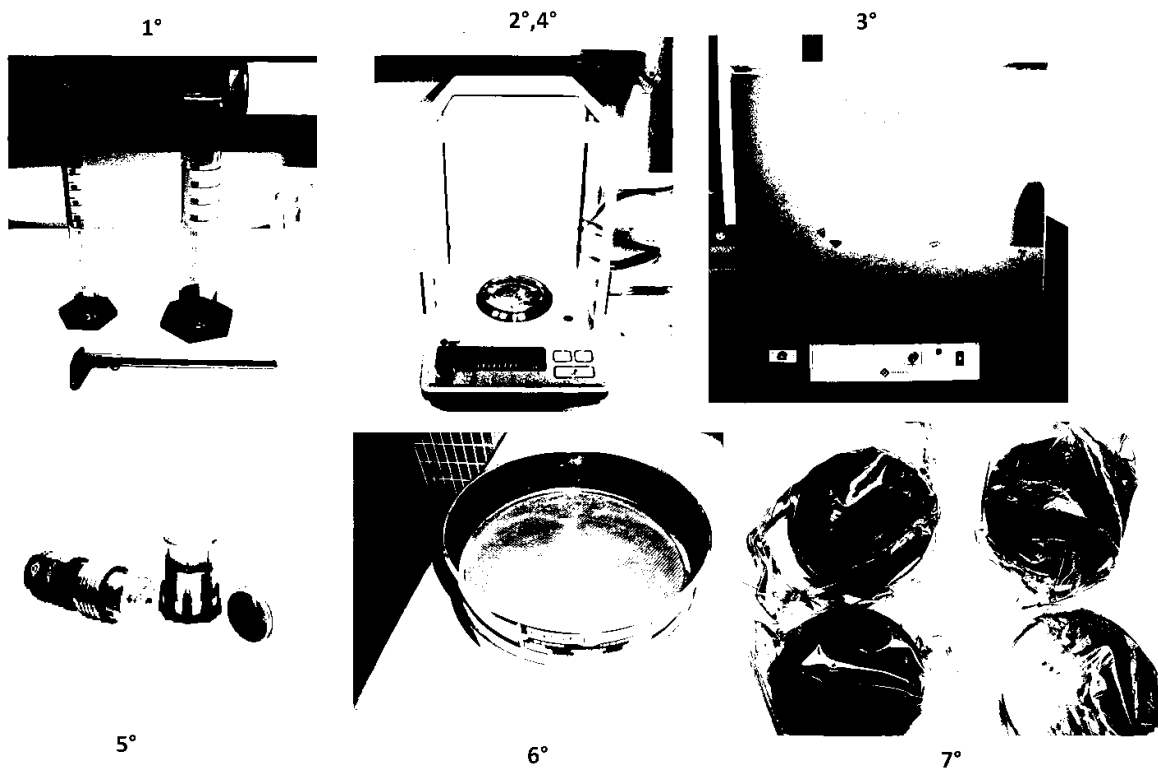


Figura 2. 2: Etapas da preparação das amostras. 1º) medição das dimensões dos frutos; 2º) pesagem dos frutos verdes em uma balança de alta precisão; 3º) secagem na

estufa a uma temperatura de 100° C; 4°) pesagem dos frutos secos; 5°) trituração; 6°) peneiramento; 7°) acondicionamento em potes cilíndricos.

2.2. Técnicas experimentais

As concentrações dos elementos instáveis (^{137}Cs e ^{40}K) e estáveis ($^{\text{natural}}\text{K}$ e $^{\text{natural}}\text{Na}$) presentes nas amostras foram determinadas através das técnicas de espectrometria de raios gama no Laboratório de Radioecologia da Universidade Federal Fluminense-UFF e ativação neutrônica no Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares - IPEN, respectivamente.

O uso de diferentes técnicas experimentais ocorreu por dois motivos. Primeiro, devido ao simples fato de não haver quantidade suficiente de amostras disponíveis para realizarmos as medidas, através da técnica de espectrometria gama, utilizada pelo nosso grupo de pesquisa. A quantidade mínima em massa de amostra necessária para gerar uma análise estatística confiável depende do chamado limite inferior de detecção do sistema de aquisição dos dados, que será descrito mais adiante. Assim, para que fosse possível medir concentrações de ^{40}K quando os frutos ainda eram muito pequenos utilizando o nosso espectrômetro gama, a quantidade em massa necessária era muito superior à quantidade de frutos disponíveis em cada florada da planta. Segundo, porque não existe um emissor gama natural para o sódio. Assim, foi necessário buscar outro método analítico para a sua medida. Neste caso, escolhemos a ativação neutrônica, por ser uma técnica também da área nuclear.

Para a análise de concentrações de ^{40}K via espectrometria gama é necessária, normalmente, uma quantidade de massa seca da ordem de 100 g. Para a utilização da técnica de ativação neutrônica não precisávamos mais que alguns poucos miligramas de amostras. Em termos de medidas de ^{137}Cs , por se tratar de amostras provenientes de uma região de acidente radiológico, foi possível usar a técnica de espectrometria gama, pois era necessário apenas 1 ou 2 g de massa seca da amostra. A utilização de mais de uma técnica também foi importante para assegurarmos a reprodutibilidade e credibilidade dos resultados.

2.2.1. Ativação Neutrônica

As concentrações de potássio e sódio nas amostras de frutos foram quantificadas através da técnica de ativação neutrônica (NAA) realizada no reator de pesquisas IEA-R1 do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN-SP). Nesta técnica, a amostra é bombardeada por nêutrons, resultando na produção de isótopos radioativos dos elementos de interesse. Posteriormente, as amostras ativadas foram então analisadas por espectrometria de raios gama.

A fim de determinar as concentrações de potássio e sódio (em g kg^{-1}) foi usada a técnica de relação de cádmio para as medidas de distribuições de fluxo térmico e epitérmico. Nesta técnica, folhas de ouro ($< 1\text{mg}$), cobertas e não cobertas com cádmio, foram irradiadas juntamente com as amostras de frutos no reator nuclear IEA-R1 (2 - 4 MW, tipo piscina) do Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares - IPEN/CNEN, permitindo a ativação simultânea destes materiais sob as mesmas condições de irradiação. Usando este procedimento, a atividade de raios gama, induzida nas folhas de ouro, foi obtida, bem como a ativação de amostras de frutas.

Amostras de frutos de 20 a 150 mg de cada espécie foram pesadas em balanças de precisão e seladas em frascos de polietileno. Posteriormente, as amostras de limão foram irradiadas em uma estação pneumática no reator nuclear usando tempos de irradiação de 30 s, tempo de decaimento de 60 s e contagem do tempo de 300s. Amostras de coco foram irradiadas por 60s, tempo de decaimento de 1800s e tempo de contagem de 600s. Cada amostra foi analisada em triplicata e os resultados são apresentados em termos de seus valores médios. A análise das amostras ativadas foi realizada pela técnica de espectrometria gama, utilizando-se um sistema composto de um detector semiconductor de germânio hiperpuro - HPGe. Esta técnica será descrita no item 2.2.2. A Figura 2.3 apresenta imagens do reator IAEA-R1 do IPEN.

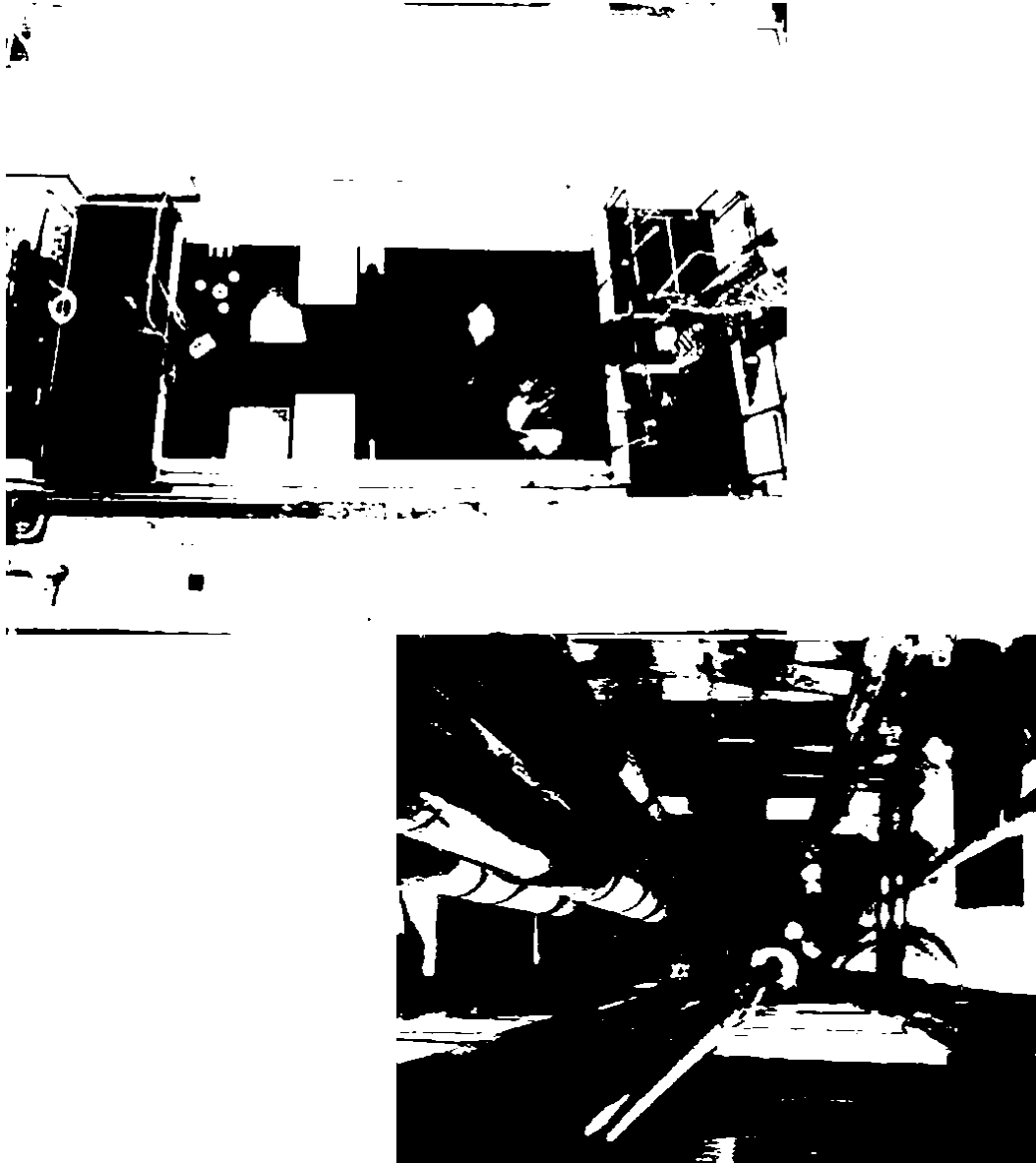


Figura 2. 3: Reator IAEA-R1 do IPEN.

2.2.2. Espectrometria gama

O arranjo experimental mais indicado para as medidas de concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K é aquele capaz de detectar o decaimento da radiação γ destes elementos. Este tipo de radiação pode ser detectado através de sua interação com cristais cintiladores ou com semicondutores.

Em linhas gerais, o aparato experimental utilizado neste trabalho é composto de uma blindagem de chumbo, um detector semicondutor (composto de germânio hiper-puro - HPGe) com sua eletrônica associada e de um sistema de aquisição de dados, gerenciados por um software específico. O detector fica posicionado no interior da blindagem, bem como a amostra a ser medida. A Figura 2.4 ilustra este arranjo experimental.

A função da blindagem é minimizar as contagens provenientes da radiação γ de fundo e, conseqüentemente, evidenciar o conteúdo das amostras. Suas paredes são compostas de uma camada externa de chumbo e de camadas internas revestidas de cobre e cádmio. Sua tampa possui uma espessa camada de chumbo também revestida de cobre e cádmio. As camadas de cobre e cádmio possuem a função de minimizar os efeitos do retroespalhamento da radiação, que ocorre nas paredes da blindagem.

Para realizar as medições de radiação γ das amostras deste estudo, foi utilizado um aparato composto de uma blindagem *ultra low-background da Canberra* com um detector de HPGe com 55% de eficiência em seu interior também da Canberra. A eficiência de detecção de um HPGe é convencionalmente medida em relação à um detector de NaI(Tl) de dimensões de 7,5cm de diâmetro por 7,5 cm de comprimento, para os raios gama de 1,33 MeV do ^{60}Co . Detectores comerciais são produzidos atualmente com eficiências relativas entre cerca de 10 e 100% (Ribas, 2002). O modelo do nosso detector é GX5522. Para realizar as medidas via ativação neutrônica foi utilizado um detector de 60 % de eficiência.

Na Figura 2.5 está apresentado um espectro de energia para a emissão gama proveniente de uma amostra de limão não contaminado típico desse trabalho comparado com um espectro de radiação de fundo. Ambos foram obtidos por um tempo de 24 h. A partir destes espectros foram determinadas as concentração de ^{40}K presente nas amostras, onde a Figura 2.6 apresenta uma ilustração do seu esquema de decaimento radioativo.

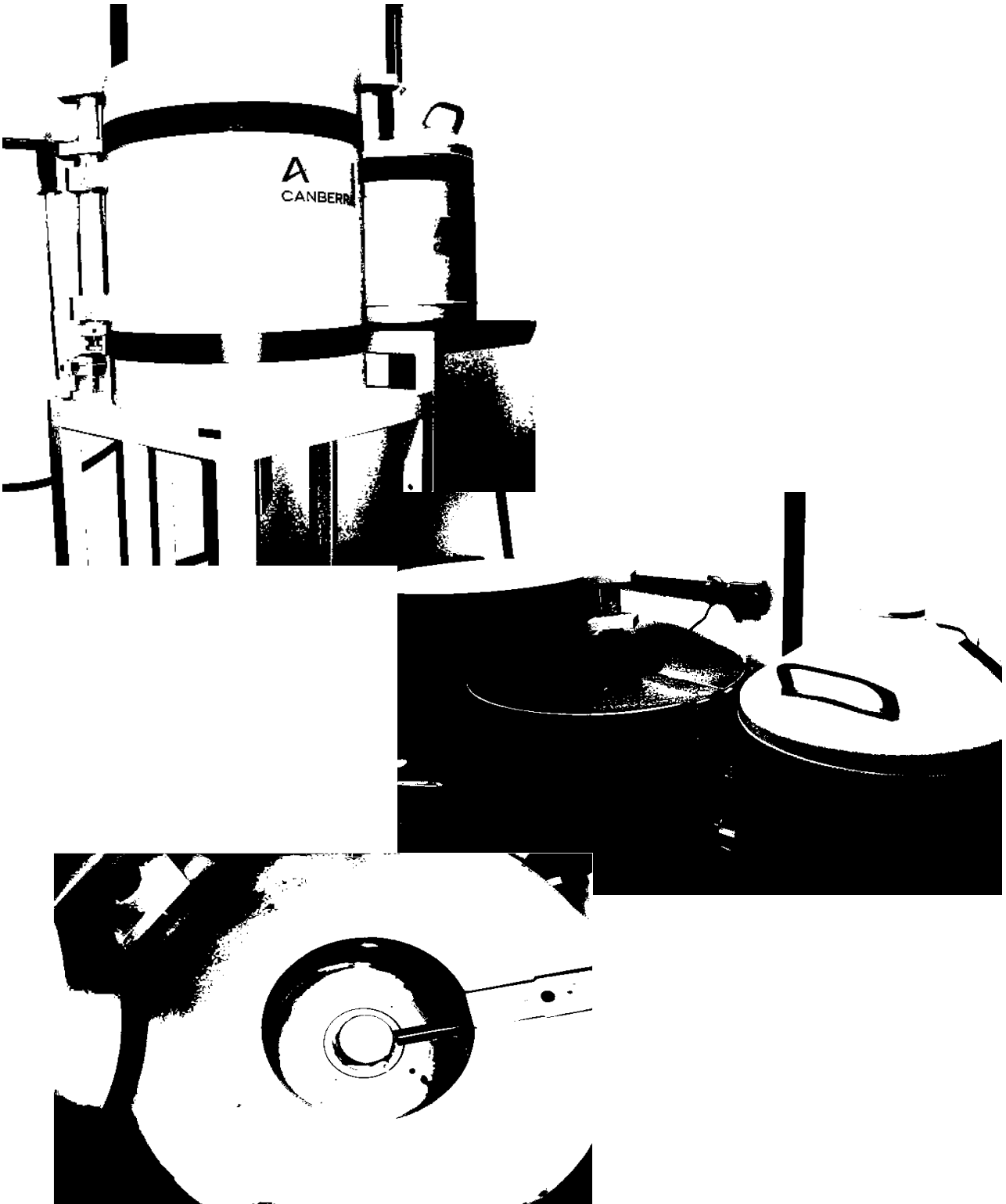


Figura 2. 4: Imagens da blindagem de chumbo e do detector de HPGe utilizado no LARA.

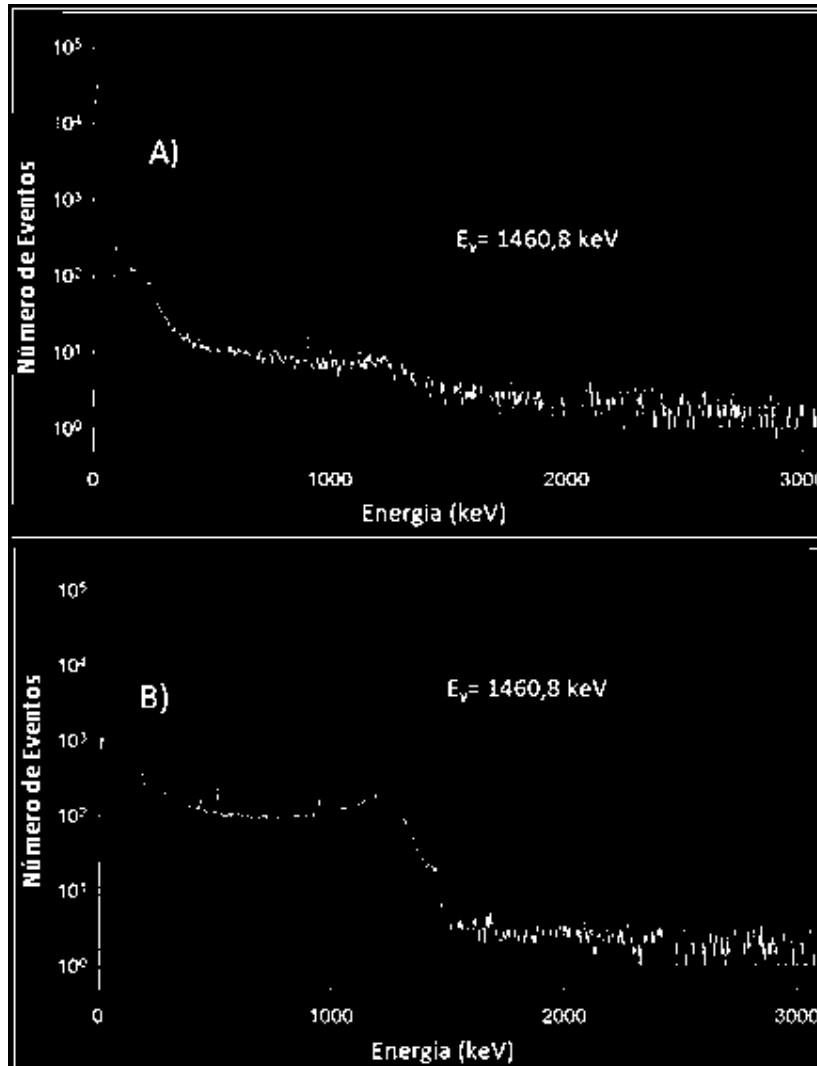


Figura 2. 5: Espectros de energia para emissões gama típicos das medidas realizadas no LARA. a) espectro de radiação de fundo; b) espectro para uma amostra de fruto não contaminado por ^{137}Cs .

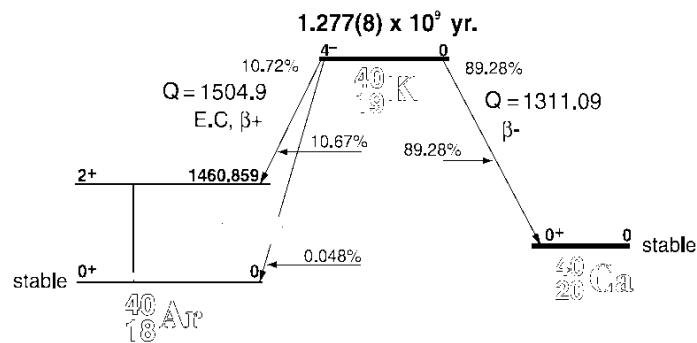


Figura 2.6: Esquema de decaimento do ^{40}K (Heath, 1964).

2.2.3. Detectores HPGe e suas principais características

Detectores são materiais que interagem com a radiação ionizante a fim de identificá-la e/ou quantificá-la. Existem diversos tipos e modelos de detectores para cada tipo de radiação ionizante que se deseja estudar. Nesta seção vamos evidenciar características que são comuns a todos os detectores gama. Dentre tais características destacamos a resolução de energia, a eficiência de detecção e o limite inferior de detecção.

2.2.3.1. Resolução em energia

Resolução de energia é um valor percentual que relaciona a largura à meia altura (*Full Width at Half Maximum* - FWHM) com o valor de energia correspondente ao centróide de um determinado pico de energia. Matematicamente podemos expressar a resolução como segue abaixo:

$$R = \Delta E / E \quad (2.1)$$

A resolução de energia é, portanto, a capacidade que o detector possui em distinguir picos de energias próximos. Quanto mais estreito e alto forem os picos produzidos por um detector melhor será a resolução do mesmo. Picos produzidos por detectores semicondutores possuem melhor resolução do que picos produzidos por detectores cintiladores. O HPGe utilizado possui resolução de 2,2 keV para o fotopico do ^{60}Co de 1,33MeV.

É conhecido da Mecânica Quântica que os átomos ocupam níveis discretizados de energia. Quando temos um arranjo de átomos em forma de cristal um átomo interage com os seus vizinhos próximos criando as chamadas bandas de energia. A banda de menor energia é a de valência que é separada por um *gap* de energia da banda de condução. Os intervalos correspondentes aos *gaps* constituem estados proibidos. Portanto para um elétron sair da banda de valência e ir para uma banda de condução é necessário fornecer energia ao sistema. Para semicondutores a energia necessária é da ordem de 1eV. Esse processo acontece rotineiramente em temperatura ambiente.

O fato do *gap* entre a banda de valência e a de condução ser da ordem de 1eV para o Ge faz com que sejam produzidas muitas correntes de fuga à temperatura ambiente. A fim de evitar a geração de ruídos e preservar o detector é que eles são operados a baixas temperaturas. No caso do Ge à temperatura do nitrogênio líquido.

Quando um elétron sai da banda de valência é criado um "buraco" nessa banda. Assim a banda de valência fica com excesso de portadores positivos e a banda de condução com excesso de portadores negativos. Devido à baixa energia necessária para vencer o *gap* são criados um número maior de portadores de carga quando comparados aos cintiladores fazendo com que detectores do estado sólido ou semicondutores possuam maior resolução.

2.2.3.2. Calibração em energia

Antes que os espectros de energia adquiridos possam ser analisados, é necessário que o arranjo experimental seja calibrado. Desta forma, será possível identificar os valores de energia da radiação gama emitida pela amostra e assim, determinar quais elementos radioativos estão presentes na amostra.

A calibração em energia do arranjo experimental consiste na utilização de fontes de radioisótopos que emitam radiação gama em energias muito bem conhecidas. A Figura 2.7 apresenta um exemplo de calibração em energia para o arranjo experimental usado, mas o procedimento é o mesmo para qualquer outro tipo de detector.

Para as calibrações no LARA utilizamos as seguintes fontes: ^{137}Cs ($E_{\gamma}=661,62$ keV); ^{241}Am ($E_{\gamma}=59,53$ keV); ^{60}Co ($E_{\gamma}=1127,23$ keV) e ($E_{\gamma}=1332,51$ keV); ^{22}Na ($E_{\gamma}=1274,54$ keV). Todas as fontes possuíam em 1° de julho de 1994 atividades de 370 kBq.

2.2.3.3. Eficiência de detecção

A eficiência está relacionada ao número de interações de radiação ocorridas dentro do volume sensível do detector. Quanto maior o número de interações maior será a eficiência de um pico de energia. Podemos falar em eficiência absoluta e em eficiência relativa. Enquanto a primeira relaciona o número de interações registradas

com o número de quantas de radiação emitidos pela fonte a segunda relaciona o número de interações registradas com o número de quantas incidentes sobre o detector.

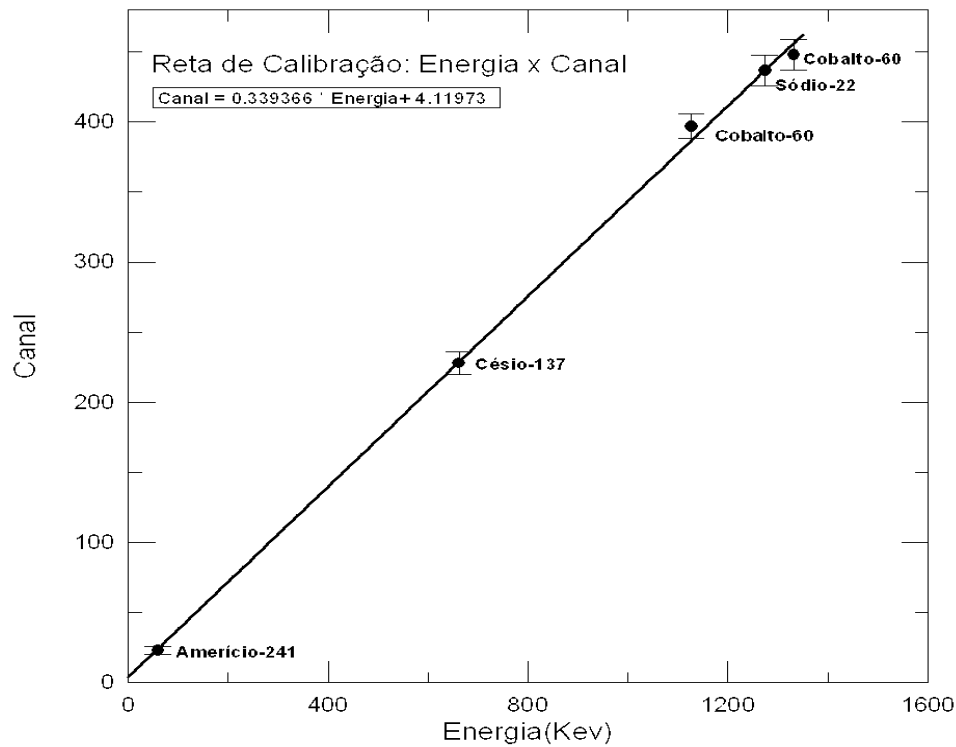


Figura 2. 7: Ilustração de uma reta de calibração em energia gama obtida em nosso trabalho.

Após o sistema ser calibrado em energia e identificado os fotopicos de cada fonte emissora de radiação gama é possível determinar o número de eventos (N) relacionados com cada emissão gama durante um intervalo de tempo (t). Isto permite construir a curva de eficiência do detector utilizado para a análise das amostras. Para tanto, pode-se usar amostras certificadas em que as atividades das fontes de raios gama emissoras são bem conhecidas com o auxílio da seguinte expressão:

$$\epsilon = \frac{N_d - N_f}{A m t P_f} \tag{2.2}$$

Onde ϵ = eficiência relativa do detector; A = concentração de atividade em Bq/Kg da amostra padrão; m = massa da amostra padrão; N_d = número de eventos ocorridos na formação de um fotopico da amostra padrão; N_f = número de eventos ocorridos na

formação de um fotopico devido a contribuição de fundo; t = tempo de aquisição dos dados e; P_{γ} = probabilidade de decaimento para um determinado nível de energia em um núcleo excitado.

Para a determinação da curva de eficiência do detector HPGe disponível no LARA foi utilizado o material de referência IAEA-375-soil fornecido pela Agência Internacional de Energia Atômica. A Tabela 2.1 apresenta os dados utilizados para a construção desta curva. A Figura 2.8 apresenta o espectro da amostra IAEA 375-soil. Os picos de ^{137}Cs e ^{40}K estão identificados, além das energias correspondentes aos elementos identificados na Tabela 2.1. É interessante lembrar que os picos apresentados de ^{137}Cs e ^{40}K na Figura 2.8 são típicos para as amostras utilizadas nesta dissertação. O esquema de decaimento do ^{40}K pode ser observado na Figura 2.6, enquanto que o esquema para o ^{137}Cs pode ser observado na Figura 2.9.

Tabela 2. 1: Elementos presentes no material de referencia IAEA-375-soil utilizados para a construção da curva de eficiência do Detector HPGe do LARA.

Elemento	Energia (KeV)	P_{γ}
^{212}Pb	238,6	0,436
^{214}Pb	295,21	0,182
^{214}Pb	351,92	0,363
^{208}Tl	583,14	0,305
^{214}Bi	609,31	0,451
^{137}Cs	661,6	0,849
^{228}Ac	911,07	0,300
^{214}Bi	1120,3	0,147
^{40}K	1460,8	0,106
^{214}Bi	1764,5	0,151
^{208}Tl	2614,5	0,358

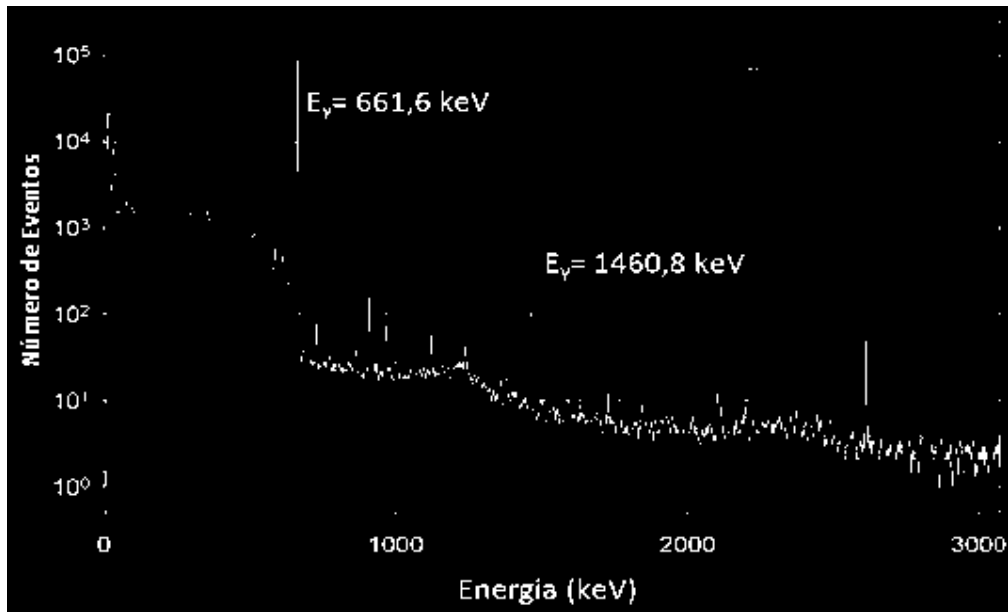


Figura 2. 8: Espectro de raios γ da amostra IAEA 375-soil.

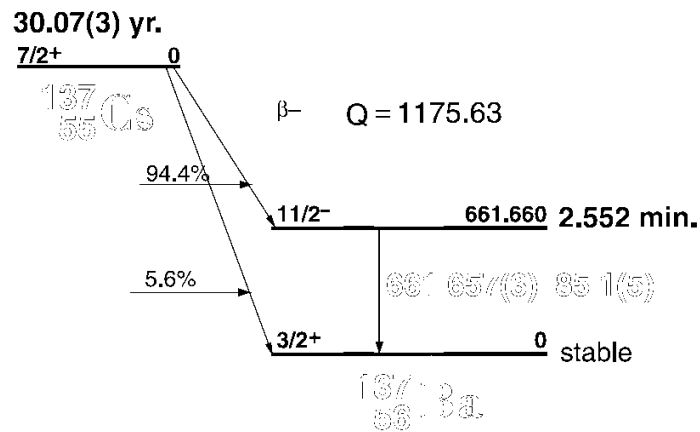


Figura 2.9: Esquema de decaimento do ^{137}Cs (Heath, 1964).

A Figura 2.10 mostra a curva de eficiência obtida de um detector HPGe do LARA. É interessante notar que quanto maior a energia menor a eficiência. Isso acontece porque quantas com energias mais altas atravessam o volume sensível mais facilmente. Havendo, portanto, menos interações. O comportamento linear

apresentado é típico para o intervalo de energia considerado. Para energias inferiores a 100 keV existem outros comportamentos como mostrado na Figura 2.11.

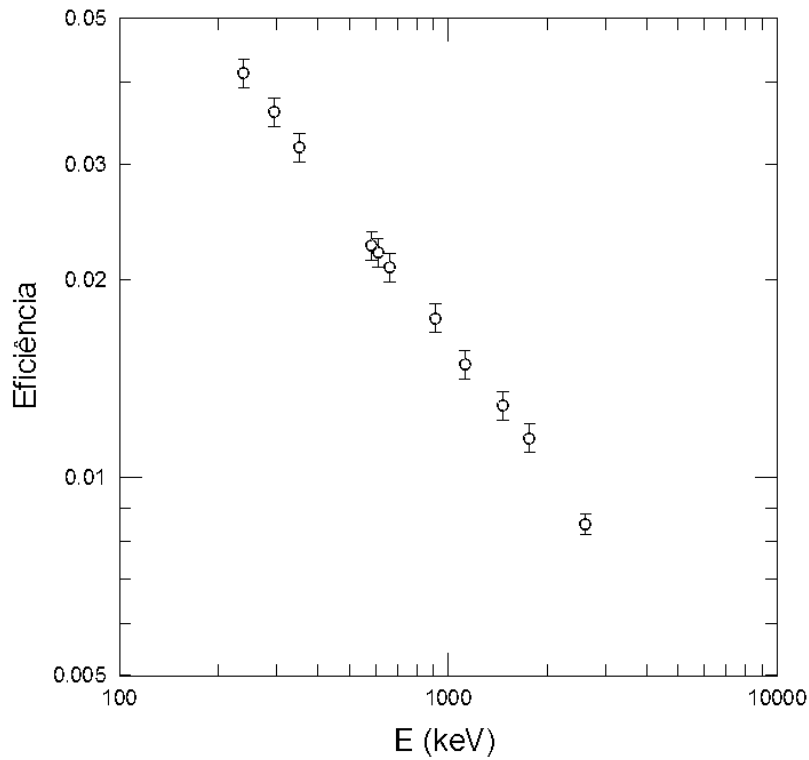


Figura 2. 10: Ilustração de uma curva de eficiência obtida para um detector HPGe do LARA, utilizando o material de referência IAEA – 375- soil. A linha cinza representa a curva $\ln(\text{Eficiência}) = -0.648 \ln(E) + 0.353$, $R^2 = 0.99$.

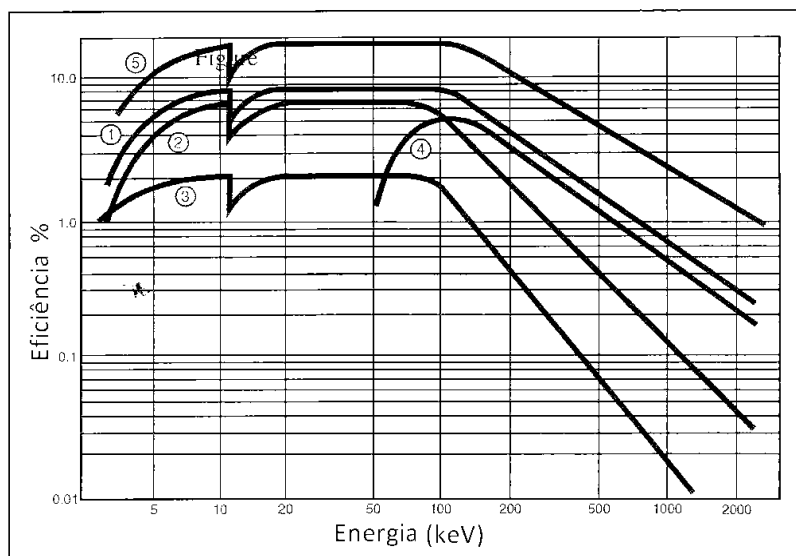


Figura 2. 11: Curvas de eficiência típica dos detectores da Canberra (Canberra,2003).

2.2.3.4. Limite inferior de detecção

O limite inferior de detecção está associado à capacidade do detector em distinguir um sinal produzido pela radiação da fonte da radiação de fundo. Além disso, ele permite determinar um intervalo de confiança para a quantificação dos radionuclídeos estudados a partir dos espectros adquiridos. O limite inferior de detecção (LID) representa a atividade mínima de uma amostra capaz de gerar uma contagem líquida em um espectro de energia com um nível de confiança de que esta atividade realmente exista. A Figura 2.12 mostra a distribuição da taxa de contagens de uma amostra próxima à distribuição das contagens do fundo (*background*) e a representação do LID. Para que este conceito seja aplicado é necessário que o número de contagens seja suficiente para que a distribuição de Poisson das contagens possa ser aproximada a uma distribuição Gaussiana.

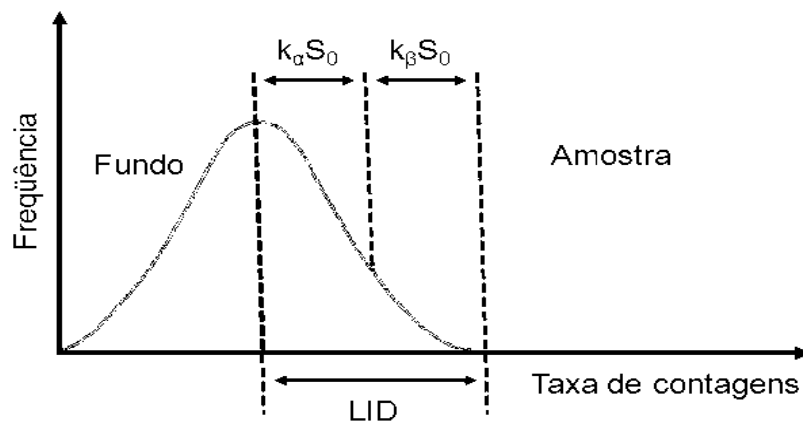


Figura 2. 12: Ilustração da sobreposição das distribuições da taxa de contagem do fundo e da amostra no cálculo do Limite Inferior de Detecção (LID).

O limite de detecção pode ser aproximado por:

$$LID \approx (k_{\alpha} + k_{\beta})S_0 \quad (2.3)$$

Onde k_{α} está relacionado ao risco (α) de determinar uma atividade na amostra e ela não estar presente, ou seja, um falso positivo; k_{β} está relacionado ao risco (β) de não

determinar uma atividade presente na amostra, ou seja, um falso negativo e; s_0 é o desvio padrão estimado para a atividade líquida da amostra.

Se a atividade bruta e o fundo forem muito próximos, temos:

$$s_0 = \sqrt{S_{bruto}^2 - S_{background}^2} \quad (2.4)$$

Além disso, fazendo $\alpha = \beta$ a equação 2.3 torna-se:

$$LID \approx 2Ks_b\sqrt{2} \quad (2.5)$$

Considerando as características físicas do detector a equação anterior assume a seguinte forma:

$$LID \approx 2Ks_b \frac{\sqrt{2}}{Gf\epsilon_p} \quad (2.6)$$

Onde $k = k_\alpha = k_\beta$; s_b = raiz quadrada do número de contagens do *background* medido em intervalo de tempo igual ao da amostra; $G = \text{Área do detector } (cm^2)/4\pi d^2$, onde d é a distância fonte-detector em *cm*; ϵ_p = Eficiência intrínseca do fotopico para o detector utilizado na energia do γ medido e; f = Fração de decaimento (Lederer & Shirley, 1978).

Admitindo $\alpha = \beta = 0,05$, isto é, um intervalo de confiança de 95%, k assume o valor de 1,645 e, conseqüentemente:

$$LID = 4,66 \frac{s_b}{f\epsilon_p} \quad (2.7)$$

Os valores determinados para o limite inferior de detecção de radionuclídeos presentes nas amostras de massa seca de frutos foram de 0,7 Bq/kg para ^{137}Cs e 6,3 Bq/kg para ^{40}K .

2.3. Análise dos Dados

2.3.1. Amostras Padrão

Para medição de uma grandeza Física qualquer é necessário obter ou criar uma referência a fim de que resultados obtidos em laboratórios localizados em diversas partes do mundo possam garantir a confiabilidade e a reprodutibilidade de seus experimentos.

Os valores das concentrações de atividade de potássio, obtidos por espectrometria gama, apresentados nesse trabalho tiveram como referência uma amostra certificada pela IAEA (*International Atomic Energy Agency*), enquanto para resultados análogos obtidos por ativação para a determinação da atividade de sódio e potássio foi utilizada uma amostra padrão certificada pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*).

A amostra do Instituto Nacional de Padrões foi a NIST 1573^a e a amostra da Agência Internacional utilizada foi a IAEA/RGK-1. A primeira amostra padrão é constituída por folhas de tomate e por isso representa uma situação mais próxima do ideal para as amostras de plantas analisadas. A segunda é recomendada para trabalhos na área de Geologia porque são amostras de quartzo, contudo elas foram utilizadas porque o coeficiente de absorção da radiação para amostras de plantas é similar ao mesmo coeficiente para amostras de rochas nos canais de energia do potássio e do céσιο. Segundo simulações, que utilizam o Método de Monte Carlo para estimar valores de eficiências de detectores para várias configurações geométricas tanto do cristal do detector quanto das amostras a serem medidas, a diferença na constituição (matriz) dos padrões não introduz uma fonte de erro significativa, uma vez que simulações a respeito da diferença de densidade entre uma amostra orgânica (frutos) e de quartzo produzem incertezas nas medidas inferiores a 3,5 % (Cornejo Díaz & Jurado Vargas, 2008).

Esta afirmativa também pode ser justificada por um cálculo mais simples, porem mais grosseiro, sobre a estimativa da absorção que ocorre por uma determinada fonte radioativa ao ultrapassar um meio absorvedor, que é colocado

entre a fonte e o detector. Os resultados são apresentados na Tabela 2.2., que apresenta o grau de atenuação de algumas emissões gama ao transpassar diferentes meios materiais. A experiência consiste em medir o número de eventos que formam os picos característicos das fontes de ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs e ^{60}Co , sobre um recipiente cilíndrico vazio e preenchido ora com solo, ora com vegetal moído, granito em pó ou água.

Tabela 2. 2: *Dados referentes a atenuação de uma determinada emissão gama ao transpassar um meio absorvedor.*

Amostra/Fonte	Energia (KeV)	Atenuação (%)
Água/ ^{241}Am	59,5	84
Água/ ^{133}Ba	383,5	86
Água/ ^{137}Cs	661,7	89
Água/ ^{60}Co	1173,2	92
	1332,5	92
Granito/ ^{241}Am	59,5	33
Granito / ^{133}Ba	383,5	70
Granito/ ^{137}Cs	661,7	75
Granito/ ^{60}Co	1173,2	82
	1332,5	81
Vegetal/ ^{241}Am	59,5	85
Vegetal/ ^{133}Ba	383,5	87
Vegetal/ ^{137}Cs	661,7	89
Vegetal/ ^{60}Co	1173,2	92
	1332,5	92
Solo/ ^{241}Am	59,5	53
Solo/ ^{133}Ba	383,5	79
Solo/ ^{137}Cs	661,7	82
Solo/ ^{60}Co	1173,2	86
	1332,5	85

2.3.2. Determinação das concentrações de atividade via espectrometria gama

A concentração de atividade pode ser determinada através de dois métodos. O primeiro é o método absoluto e o segundo é o método relativo.

O método absoluto é aquele que leva em consideração as propriedades físicas embutidas na eficiência do detector. A concentração de uma amostra é relacionada com a eficiência do detector através da seguinte expressão:

$$A = \frac{N_d - N_f}{m \epsilon t P_\gamma} \quad (2.8)$$

Onde: A=concentração de atividade em Bq/Kg da amostra desconhecida; m= massa da amostra desconhecida; N_d = número de eventos ocorridos na formação de um fotopico em uma amostra desconhecida; N_f = número de eventos ocorridos na formação de um fotopico devido a contribuição de fundo; ϵ = eficiência do detector; t= tempo de aquisição dos dados e; P_γ = probabilidade de decaimento para um determinado nível de energia em um átomo excitado.

O método relativo é aquele que desconsidera as propriedades físicas do detector quando todos os parâmetros do denominador da Equação 2.8 são mantidos fixos. Neste método, portando, para determinar a concentração de atividade para amostras desconhecidas basta conhecer a atividade de uma amostra padrão e o número de eventos ocorridos na formação de um fotopico característico do mesmo radionuclídeo na amostra desconhecida e na amostra padrão. Desta forma quando escrevemos a Equação 2.8 para a amostra padrão e para a amostra desconhecida e dividimos uma pela outra obtemos a seguinte expressão:

$$A_D = A_P \frac{N_D - N_{FD}}{N_P - N_{FP}} \quad (2.9)$$

Onde: A_D =concentração de atividade em Bq/Kg da amostra desconhecida; A_P =concentração de atividade em Bq/Kg da amostra padrão; N_D =número de eventos ocorridos na formação de um fotopico em uma amostra desconhecida; N_P =número de eventos ocorridos na formação de um fotopico em uma amostra padrão; N_{FD} =número de eventos ocorridos na formação de um fotopico devido a contribuição de fundo para a amostra desconhecida e ; N_{FP} =número de eventos ocorridos na formação de um fotopico devido a contribuição de fundo para a amostra padrão.

As incertezas para as atividades de ^{137}Cs ficaram entre 3 e 7 % e em torno de 15 a 20 % para as atividades de ^{40}K , através do uso da técnica de espectrometria gama.

2.3.3. Determinação das concentrações de atividade via NAA

Para a determinação do análogo ao método absoluto para ativação neutrônica é necessário conhecer os parâmetros envolvidos na expressão abaixo:

$$A = \frac{N_A \phi \sigma f F}{M} (1 - \exp^{-\lambda T_i}) \quad (2.10)$$

Onde: N_A = número de Avogadro; ϕ = fluxo de nêutrons; σ = seção de choque; m = massa da amostra; f = fração do isótopo que irá sofrer ativação; F = fração do elemento ativado; T_i = tempo de ativação; M = massa atômica do elemento e; λ = constante de decaimento.

As concentrações de potássio e de sódio foram calculadas a partir dos picos de energia gama de 1525 keV do ^{42}K e 1368 keV de ^{24}Na . A acurácia e a precisão das medidas foram realizadas através da medição do padrão de referência certificado pelo NIST constituído de folhas secas de tomate (código NIST 1573a). As incertezas das medidas variaram entre 5 a 10% para o sódio e potássio. A Figura 2.13 mostra um espectro de energia típico para uma amostra de limão obtido por espectrometria gama, após a ativação neutrônica da amostra. Nesta figura estão evidenciados os fotopicos do ^{42}K e do ^{24}Na . A Figuras 2.14 e 2.15 apresentam os esquemas de decaimento para o ^{42}K e ^{24}Na , respectivamente.

A comparação entre os resultados de medidas de potássio pelos métodos NNA e espectrometria gama convencional em amostras de frutos foram muito satisfatórios.

É interessante mencionar que em estudos radioecológicos, as concentrações de radionuclídeos são expressas usualmente em unidades de Bq/kg. Contudo, unidades de massa permitem obter melhores informações sobre o comportamento de cátions inorgânicos monovalentes como nutrientes vegetais. As unidades que expressam a massa em meios ambientais para o solo e os órgãos das plantas são em g/kg. Estas unidades de massa também podem ser expressas como partes por milhão

(ppm), que é equivalente a mg/kg. Desse modo, a concentração de atividade (AC), em Bq/ kg⁻¹, pode ser convertida em g/kg, pela seguinte equação:

$$C \left(\frac{g}{kg} \right) = 7.56 \times 10^{-17} A T_{1/2} AC \left(\frac{Bq}{kg} \right) \quad (2.11)$$

Onde: A é a massa atômica do radionuclídeo em g/mol, e T_{1/2} é a meia-vida do radionuclídeo em anos.

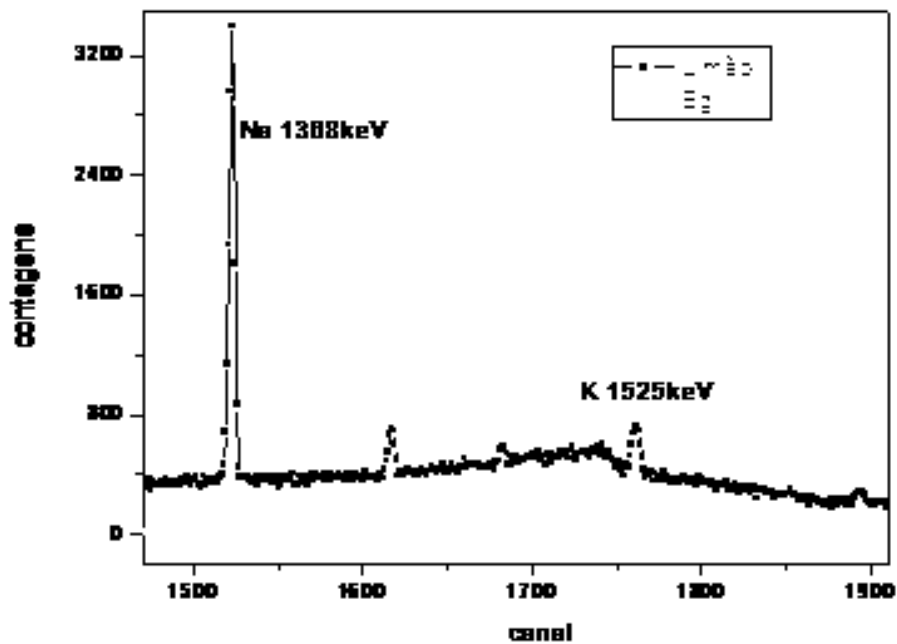


Figura 2. 13: Espectro de energia típico obtido após a ativação de uma amostra de limão. O espectro vermelho é representa a radiação de fundo enquanto o preto é da amostra de limão.

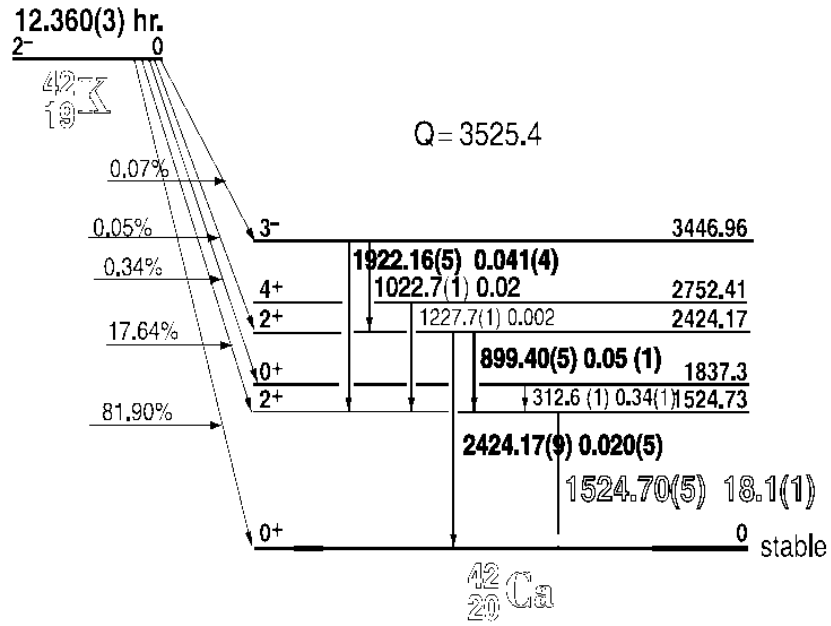


Figura 2.14: Esquema de decaimento do ^{42}K (Heath, 1964).

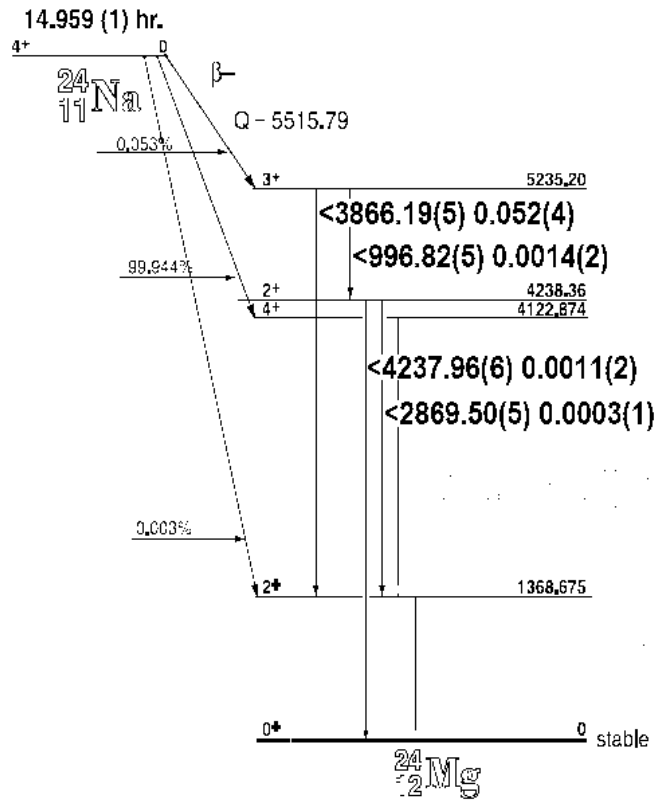


Figura 2.15: Esquema de decaimento do ^{24}Na (Heath, 1964).

Capítulo 3

Fundamentação de Conceitos e Modelos

Nesse capítulo serão apresentados os principais conceitos fisiológicos para a compreensão dos mecanismos de absorção, transporte e acúmulo de macronutrientes e substâncias radioativas em vegetais. Também será descrito um modelo teórico, desenvolvido neste trabalho em conjunto com o Grupo de Estudios Ambientales (GEA) da Universidade de San Luís, Argentina, que permite descrever a incorporação de nutrientes e substâncias radioativas durante o processo de frutificação de plantas tropicais. A partir dos resultados deste trabalho foram determinadas as constantes utilizadas no modelo.

3.1. Descrição das espécies estudadas

3.1.1. Limoeiro

Limoeiro (*Citruslimon B.*) é uma árvore do tipo frutífera lenhosa da família das rutáceas. Tende a se desenvolver em ambientes secos ou úmidos e prefere áreas com luz solar em abundância e índices anuais de pluviosidade entre 25 e 125 cm. As árvores podem chegar até 4 ou 5 m de altura, espinescentes, muito ramificadas, de caule e ramos castanho-claros. As folhas são alternas, oblongo-elípticas de 6 a 11 cm de comprimento, com pontuações translúcidas. Possuem coloração verde-claro quando jovens e tornam-se mais escuras à medida que vão envelhecendo. As inflorescências são de flores axilares, alvas ou violetas, em cacho. Os frutos são ovais e apresentam uma protuberância no ápice. Reproduz-se por estacas de galhos, em solo arenoso e bem adubado, de preferência em regiões de clima quente ou temperado. Propaga-se também por sementes, que requerem solo leve, fértil e bem arejado, em local

ensolarado e protegido dos ventos. Frutifica durante todo o ano, em inúmeras variedades, que embora mudem no tamanho e na textura da casca, que pode ser lisa ou enrugada, quanto à cor, variam do verde-escuro ao amarelo-claro, exceto uma das espécies, que se assemelha a uma tangerina. Os limões contêm uma grande quantidade de ácido cítrico, o que lhes confere um gosto ácido. No suco de limão, essa acidez chega a um pH de 2 a 3, em média. Os limões servem-se regularmente como limonada (sumo de limão natural com água e açúcar), caipirinha ou como adorno para as bebidas alcoólicas e refrigerantes de cola com uma rodela dentro ou na borda do copo. Atualmente é uma das frutas mais conhecidas e utilizadas no mundo. (Mc Gee, 2011).

3.1.2. Coqueiro

Coqueiro é um membro da família Arecaceae (família das palmeiras). É a única espécie classificada no gênero *Cocos*. Prosperam em terrenos arenosos e são altamente tolerantes a salinidade. Preferem ambientes com índice anual de pluviosidade entre 150 e 250 cm e umidade relativa entre 70 e 80%. É uma árvore que pode crescer até 30 m de altura. As folhas pinadas podem medir de 4 a 6 metros de comprimento e de 60 a 90 cm de largura. As folhas caem completamente, deixando o tronco liso. As floradas são contínuas. Os frutos são produzidos em grupos próximos ao tronco. Geralmente os frutos possuem forma de noz e podem medir até 20 cm de diâmetro. Cerca de quatro meses depois de germinar, a noz se enche de líquido; aos cinco meses, atinge seu tamanho definitivo e começa a desenvolver uma polpa gelatinosa; aos sete, a casca começa a endurecer; e com um ano o fruto está maduro. O coco-verde, com cinco a sete meses, oferece seus prazeres específicos: a doce água de coco; e uma polpa úmida, delicada e gelatinosa composta principalmente de água, açúcares e outros carboidratos. No coco maduro, com 11-12 meses, a água se torna menos doce e menos abundante, e a polpa, firme, gorda e branca. A polpa do coco contém cerca de 45% de água, 35% de gordura, 10% de carboidratos e 5% de proteínas (Mc Gee, 2011).

O coco proporciona sabor de fundo em muitas culinárias tropicais, desde o Sul da Índia e o Sudeste Asiático até a África e a América do Sul. O que geralmente se

emprega é o leite do fruto, um líquido rico e saboroso em que podem ser cozidos alimentos de todo tipo, desde carnes e peixes a hortaliças e arroz (Mc Gee, 2011).

3.2. Nutrientes vegetais

As plantas são capazes de sintetizar todas as moléculas orgânicas de que necessitam a partir da água, do dióxido de carbono atmosférico e de elementos minerais, utilizando a radiação solar como fonte de energia. As plantas absorvem os elementos presentes na solução do solo, mesmo que deles não necessitem. Assim, na natureza, estão à disposição das plantas, quase todos os elementos da tabela periódica. A cultura de plantas em solução nutritiva permitiu identificar os elementos essenciais para as plantas, designados por nutrientes vegetais. Assim, nutrientes vegetais são elementos obtidos principalmente na forma de íons inorgânicos do solo e podem ser classificados de acordo com critérios fisiológicos ou quantitativos (Epstein, 1999; Varennes, 2003; Taiz, 2004).

Segundo Arnon e Stout (1939) existem três critérios que devem ser preenchidos para um elemento ser considerado essencial: o primeiro critério é na ausência do elemento a planta não cresce normalmente nem completa o seu ciclo de vida, ou seja, não se desenvolve corretamente e não se reproduz. O segundo é que nenhum outro elemento consegue substituí-lo completamente, ou seja, a deficiência de um dado elemento só pode ser corrigida através do seu fornecimento e não de algum outro. O terceiro é que o elemento em questão deve ser importante para todas as plantas. Segundo esses critérios existem apenas 17 nutrientes ditos essenciais.

Contudo, existem algumas discussões entre autores de Fisiologia Vegetal sobre se os três critérios devem ser adotados simultaneamente ou não para considerar um elemento como nutriente essencial. Demonstrar que um elemento é essencial exige que as plantas sejam cultivadas sob condições experimentais nas quais apenas o elemento sob investigação encontra-se ausente. Tais condições são extremamente difíceis de alcançar com plantas cultivadas em meio complexo como o solo (Taiz, 2004). Por isso técnicas hidropônicas são fundamentais na determinação da

importância de um elemento para uma planta. A hidroponia consiste justamente em fornecer nutrientes para uma planta via solução nutritiva altamente controlada.

Além disso, as quantidades demandadas de cada nutriente são variáveis, mas todos eles são igualmente importantes. Entretanto, para fins didáticos, os elementos essenciais podem ser ainda classificados em macronutrientes, micronutrientes e benéficos. Os macronutrientes são os elementos básicos necessários em maior volume às plantas. Carbono, Oxigênio, Hidrogênio (retirados do ar e da água), Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre (retirados do solo, sob condições naturais) são exemplos de macronutrientes. Já os micronutrientes são requeridos em pequenas quantidades, de miligramas a microgramas. Boro, Cloro, Cobre, Ferro, Manganês, Molibdênio, Níquel e Zinco são exemplos de micronutrientes. O sódio, o silício e o cobalto são designados por elementos benéficos porque estimulam o crescimento de algumas plantas, não sendo essenciais, ou porque são essenciais apenas para algumas espécies vegetais (Epstein, 1999; Varennes, 2003; Taiz, 2004).

As próximas duas subseções serão utilizadas para descrever os nutrientes vegetais que foram estudados neste trabalho: o sódio (Na) e o potássio (K).

3.2.1. Potássio

O potássio é um metal alcalino localizado na família 1A da tabela periódica. Possui número atômico igual a 19. Dentre todos os isótopos conhecidos desse elemento, o mais abundante é o ^{39}K . Sua presença na natureza representa mais de 92% em relação a soma de todos os isótopos de potássio. Dentre os radioisótopos o mais abundante é o ^{40}K . Ele é um emissor natural de radiação beta e gama, onde sua abundância na natureza é de apenas 0,012%. Este já se encontrava presente na massa que deu origem ao nosso planeta, assim como outros radionuclídeos que possuem uma meia-vida maior que 4,6 bilhões de anos, valor considerado como idade da Terra. A meia-vida do ^{40}K é igual a $1,277 \times 10^9$ anos. Ele junto com o ^{238}U e o ^{232}Th são responsáveis por boa parte da dose anual de radiação natural, já que os mesmos estão presentes nas rochas e sedimentos e, portanto, com alta potencialidade de ingressar em nossa cadeia alimentar.

O potássio, além de ser um elemento essencial para as plantas, é um dos sete elementos mais abundantes na crosta terrestre. Contudo, apenas 2% do potássio total presente na crosta terrestre está disponível para as plantas. Ele é conhecido como potássio livre, encontra-se no solo na forma de cátion K^+ .

O potássio, juntamente com o fósforo e nitrogênio, é um elemento que mais frequentemente influencia o crescimento vegetal. É o cátion mais abundante nas plantas e não é incorporado em moléculas orgânicas. Determina em grande medida o potencial osmótico das células e neutraliza os ânions. Regula a abertura e o fechamento dos estômatos e a expansão celular. Como os estômatos são importantes na regulação da perda de água pelas plantas, o potássio ajuda a diminuir perdas de água e aumenta a tolerância a secas. É necessário para a síntese de proteínas. Ele também ativa muitas enzimas envolvidas na respiração e na fotossíntese. Aumenta a tolerância ao frio, geada e doenças. Confere resistência em processos que retiram a rigidez na base do caule nos cereais. As plantas carentes em potássio apresentam manchas cloróticas nas margens das folhas mais velhas, que mais tarde necrosam (Varenes, 2003; Taiz, 2004).

3.2.2. Sódio

O sódio também é um metal alcalino localizado na família 1A da tabela periódica. Possui número atômico igual a 11. Dentre todos os isótopos conhecidos desse elemento o mais abundante é o ^{23}Na . Sua presença na natureza representa praticamente 100% em relação a soma de todos os isótopos de sódio. Não existe nenhum emissor gama natural mensurável presente nas plantas, por isso como já mencionamos anteriormente a necessidade de recorrer a outras técnicas.

Existem controvérsias quanto a essencialidade deste elemento para as plantas, mas ele estimula o crescimento por meio de uma maior expansão celular, além de poder parcialmente substituir o potássio como um soluto osmoticamente ativo. É essencial para algumas plantas com mecanismo de fotossíntese em C4. As plantas são classificadas em C3 ou C4 de acordo com o número de carbonos presentes nos compostos produzidos pela fotossíntese. As plantas cultivadas são divididas em

natrofilicas e natrofólicas, conforme são ou não beneficiadas pela presença do elemento. Nas plantas natrofilicas, o sódio substitui parcialmente o potássio, resultando em maior resistência à secura, crescimento mais rápido quando a planta é jovem e maior acumulação de glúcidos de reserva (Varenes, 2003; Taiz, 2004).

3.3. Composição do Solo

Os solos são constituídos por três fases: sólida (matriz), líquida (solução do solo) e gasosa (atmosfera do solo). A matriz contém substâncias minerais e matéria orgânica. As substâncias minerais são classificadas quanto à sua granulometria em partículas arenosas (presentes na fração areia, de tamanho entre 2,00 mm e 0,05 mm, formado principalmente por cristais de quartzo e minerais primários), siltosas (presentes fração silte, de tamanho entre 0,05 e 0,002 mm, geralmente são muito erosíveis) e argilosas (presentes na fração argila, de tamanho menor que 0,002 mm, representando o tamanho máximo de um coloide). A proporção das partículas de diferentes dimensões é designada por textura do solo (Varenes, 2003).

Os minerais argilosos possuem uma predominância de cargas negativas, umas permanentes e outras dependentes do pH. Estes diferem quanto às cargas que transportam, superfície específica, capacidade de fixar íons de potássio e amônio, e ainda por serem ou não expansíveis.

A matéria orgânica inclui uma grande variedade de seres vivos, desde bactérias, fungos e actinomicetes, até protozoários, nematódeos, ácaros e anelídeos. Os organismos do solo, em especial os microrganismos, favorecem a decomposição de resíduos orgânicos, mas são também responsáveis pela síntese de moléculas orgânicas de elevada estabilidade (conhecidas como substâncias húmicas), que são o principal constituinte do húmus e contribuem para propriedades tão importantes como a capacidade de retenção de água e nutrientes.

A solução do solo contém vários elementos na forma de íons livres ou de elementos complexos e quelatos, formados por ligações covalentes de minerais e compostos orgânicos.

A superfície do solo tem teores mais baixos de oxigênio e mais altos de vapor de água e dióxido de carbono em comparação com a atmosfera. Um bom arejamento do solo é indispensável para a respiração das raízes e organismos do solo. Em solos compactados, com baixa porosidade, ou em solos alagados, geram-se condições de anaerobiose (baixo potencial redox) que são toleradas apenas por algumas plantas e organismos.

A gênese do solo envolve a alteração de minerais primários e a formação de secundários, e origina camadas com diferentes cores e características, designadas por horizontes do solo. Os pedologistas estudam secções verticais do solo (perfis) que expõem os vários horizontes, para classificarem o solo. Existem diversas nomenclaturas do solo, mas a classificação FAO (*Food and Agriculture Organization* das Nações Unidas), aceita por todos os investigadores, permite dividir os solos existentes no globo em 28 unidades principais (Varenes, 2003).

3.4. Propriedades do Solo

A cor do solo influencia a sua temperatura, visto que solos escuros aquecem mais depressa do que os claros. A temperatura afeta todos os processos que ocorrem nos solos, desde o crescimento radicular à atividade dos microrganismos. As coberturas do solo e a vegetação isolam o solo, evitando grandes amplitudes térmicas.

Quase todas as propriedades físicas do solo dependem do teor e tipo de argila presente. A consistência do solo é traduzida pela adesividade, plasticidade, friabilidade e dureza. Os solos arenosos são soltos, brandos e não são plásticos nem adesivos, enquanto que os solos argilosos ricos em esmectites são adesivos, plásticos, duros e firmes. Os solos arenosos são pouco compressíveis, mas a maior porosidade dos solos argilosos torna-os mais susceptíveis à compressão (Mengel, 2007).

Segundo Varenes (2003), a estrutura do solo descreve o arranjo tridimensional das partículas do solo, usualmente unidas em agregados. Solos bem agregados e ricos em matéria orgânica apresentam maior porosidade e menor densidade aparente. A matriz do solo pode adsorver íons por processos físicos e químicos. A adsorção de cátions por atração eletrostática resulta numa capacidade de troca catiônica,

fenômeno de extrema importância por reter os cátions numa forma permutável, evitando a sua perda por lixiviação e mantendo-os disponíveis para as plantas. O húmus e os minerais argilosos dos grupos da vermiculite e esmectite apresentam elevada capacidade de troca catiônica, enquanto que no outro extremo se situam os minerais do grupo da caulinite e os óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e magnésio. Os cátions com maior carga e menor tamanho são adsorvidos preferencialmente em relação aos outros, sobretudo nos colóides com maior capacidade de troca catiônica.

Os minerais argilosos pertencentes aos grupos da ilite, esmectite e vermiculite contêm íons potássio e amônio não hidratados adsorvidos fortemente no seu interior, dizendo-se que ocorreu a sua fixação. Estes cátions não trocam com outros, mas podem difundir lentamente para fora das partículas, estando em equilíbrio com o nutriente em solução (Varenes, 2003).

Os ânions (com exceção dos íons nitrato e cloreto) são adsorvidos por troca de ligações covalentes, substituindo grupos hidroxilo na superfície dos colóides, em particular nos hidróxidos de alumínio e oxi-hidróxidos de ferro, onde ficam unidos covalentemente. Os íons fosfato podem estabelecer uma segunda ligação dando origem a um quelato.

A reação do solo é avaliada através do pH, medido em água ou em soluções salinas. A reação do solo condiciona o crescimento vegetal, a atividade dos microrganismos e a disponibilidade de nutrientes. Em solos ácidos podem ocorrer toxicidades de alumínio e magnésio e os níveis de cálcio, magnésio, fósforo e molibdênio em solução são baixos. Nos solos alcalinos, em particular nos calcários, surgem deficiências de fósforo e dos micronutrientes ferro, zinco, magnésio e boro. A correção da acidez é feita recorrendo à aplicação de calcários, operação designada por calagem. A quantidade de calcário a aplicar para elevar o pH, ou eliminar o alumínio de troca, corresponde à necessidade em cal (Varenes, 2003).

Os solos alomórficos têm teores relativamente elevados de sais podendo ser salinos, quando existem muitos sais em solução, sódicos quando o sódio domina o complexo de troca, e sódico-salinos quando têm características intermediárias. A

salinização dos solos deriva frequentemente da rega com água de má qualidade em solos sem drenagem interna adequada.

O potencial de oxidação-redução (potencial redox) dos solos mede o seu estado de oxidação. Nos solos bem arejados os microrganismos oxidam a matéria orgânica e reduzem o oxigênio a água. Em solos alagados, microrganismos anaeróbios decompõem a matéria orgânica e reduzem substâncias que incluem íon nitrato, compostos de magnésio e ferro, e íon sulfato (Varenes, 2003).

Em análises prévias de nosso Grupo (Sanches *et al.*, 2008; Anjos *et al.*, 2009) foram realizadas análises físico-químicas dos solos estudados neste trabalho, a fim de compreender como ocorre a absorção de sais minerais pelas raízes das plantas. Estas foram realizadas em colaboração com o Instituto de Geologia da Universidade de São Paulo em 2008. A Tabela 3.1 apresenta as principais propriedades dos solos estudados.

Tabela 3.1: *Propriedades dos solos estudados neste trabalho.*

Solo	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	pH (KCl)	Matéria orgânica C (%)	CEC (cmol/kg)
Niterói	40 - 46	45 - 52	6 - 8	7,1 – 7,3	1,8 – 2,0	4,5 – 5,5
Goiânia	47 - 58	35 - 43	7.3 -10	6,2 – 7,8	1,5 -1,7	5,0 – 5,5

CEC = Capacidade de troca iônica

3.5. Transporte e Absorção de Nutrientes

Os nutrientes deslocam-se na solução do solo em direção às raízes, quer por movimento convectivo na massa de água que é absorvida pelas plantas, processo designado por fluxo de massa, quer por difusão dos locais de maior para os de menor concentração. A velocidade de transporte depende do teor de água no solo, da concentração do nutriente, da velocidade com que o nutriente é absorvido pela planta, da velocidade de difusão do nutriente na água, da temperatura, e de características do solo que influenciam a tortuosidade do percurso e a adsorção dos elementos na matriz. A velocidade de transporte é grande para o nitrogênio,

considerado como nutriente móvel, pequena para o fósforo, nutriente imóvel no solo, e intermediária para o potássio (Varenes, 2003).

A absorção de água e nutrientes é dependente da formação de um sistema radicular com um comprimento adequado à espécie vegetal. O crescimento das raízes depende de características genéticas, mas é também influenciado por fatores ambientais como a temperatura, o arejamento, o pH, o teor de água e nutrientes, e a compactação do solo. O movimento radial dos nutrientes nas raízes pode dar-se nos espaços intercelulares e poros das paredes celulares (apoplasto), ou no interior das células (simpoplasto). Embora as paredes celulares sejam porosas, permitindo a passagem dos íons, possuem cargas negativas que adsorvem cátions por atração eletrostática. A componente lipídica das membranas biológicas é impermeável aos íons. Proteínas de transporte vão mediar a travessia das membranas, podendo ser subdivididas em bombas, transportadores e canais iônicos. As bombas vão realizar um transporte ativo, com gasto de energia. As mais bem caracterizadas transportam cátions através das membranas, com consumo de ATP, e geram um gradiente elétrico entre o citosol e o apoplasto, que é utilizado para o transporte passivo de cátions por transportadores ou canais iônicos. A entrada de ânions é feita de modo ativo, sendo acompanhado por cátions, processo designado por co-transporte (Varenes, 2003).

A velocidade de absorção dos nutrientes depende da sua abundância à superfície radicular, do tamanho do cátion, da carga do ânion, do pH, da temperatura e do arejamento do solo. O balanço entre cátions e ânions absorvidos vai influenciar o pH da rizosfera, a atividade das bombas de prótons e a concentração de ácidos orgânicos nas plantas. A presença de elevada quantidade de um nutriente no solo pode inibir a absorção de outro, fenômeno designado por antagonismo iônico.

O transporte de água e solutos no xilema deriva do gradiente do potencial de água entre raiz e parte aérea e dá-se geralmente apenas no sentido ascendente. O fluxo resulta, sobretudo, da transpiração, mas mesmo na sua ausência, a parte aérea continua a receber nutrientes por movimento xilêmico devido à pressão de raiz. O transporte no floema depende do carregamento de açúcares e outras substâncias, que são acompanhadas pela entrada de água e fluxo em direção aos locais onde se dá a

remoção. As folhas expandidas são o principal local de carregamento e os destinos são as raízes, os ápices vegetativos e os órgãos reprodutores. Em algumas situações, como deficiente absorção de nutrientes, formação de órgãos reprodutores, ou época da queda das folhas, ocorre grande remobilização de nutrientes à custa da degradação de moléculas nas folhas expandidas e transporte dos nutrientes pelo floema para outros locais. Os nutrientes apresentam diferente mobilidade no floema, sendo o cálcio, o magnésio e o boro os menos móveis, e os macronutrientes (com exceção do cálcio) os mais móveis (Varenes, 2003).

Em termos de absorção de nutrientes pelas células são identificados dois mecanismos: transportadores e canais (Figura 3.1). Canais são proteínas transmembranas que funcionam como poros seletivos. Como a especificidade do transporte depende do tamanho do poro e da carga elétrica mais do que da ligação seletiva, o transporte em canais limita-se principalmente a íons e à água (Taiz, 2004).

Quando o transporte é feito por esse processo não há gasto de energia pela célula e o transporte é chamado passivo. A absorção é dada pela diferença de potencial entre o meio celular e o meio externo. Enquanto o potencial externo é maior que o meio interno há a absorção de cátions. À medida que vai acontecendo a absorção o meio interno vai ficando mais positivo até que é alcançado um equilíbrio entre os meios interno e externo da célula e então encerra-se o transporte por esse processo até que o meio interno volte a ficar com potencial menor do que o meio externo.

Os canais não estão abertos todo o tempo: proteínas-canal têm estruturas denominadas portões que abrem e fecham o poro em resposta a sinais externos. Sinais que podem abrir ou fechar canais incluem mudanças de voltagem, ligação hormonal e luz (Taiz, 2004).

Outro mecanismo de transporte ocorre através dos transportadores. Transportadores são proteínas localizadas na membrana celular que ligam a molécula transportada em um lado da membrana e a liberam do outro lado. Proteínas específicas são transportadoras de elementos específicos. Por isso, existem inúmeros tipos de transportadores nas membranas celulares.

Embora, em geral, uma determinada proteína de transporte seja altamente específica para os tipos e substâncias que transportam, sua especificidade não é absoluta, ela via de regra também transporta uma pequena família de substâncias relacionadas. Por exemplo, em plantas um transportador de K^+ na membrana plasmática pode transportar Rb^+ e Na^+ , mas K^+ é geralmente preferido. (Taiz, 2004)

Assim, elementos da mesma família podem ser confundidos pelos transportadores e serem absorvidos. Como o $^{137}Cs^+$ e o K^+ são da mesma família ambos podem ser incorporados à célula vegetal sem distinção. Portanto o céσιο é incorporado à célula como se fosse um nutriente. Essa indistinção feita entre $^{137}Cs^+$ e o K^+ pelas plantas é que motivou vários pesquisadores a estudar a correlação entre esses dois elementos.

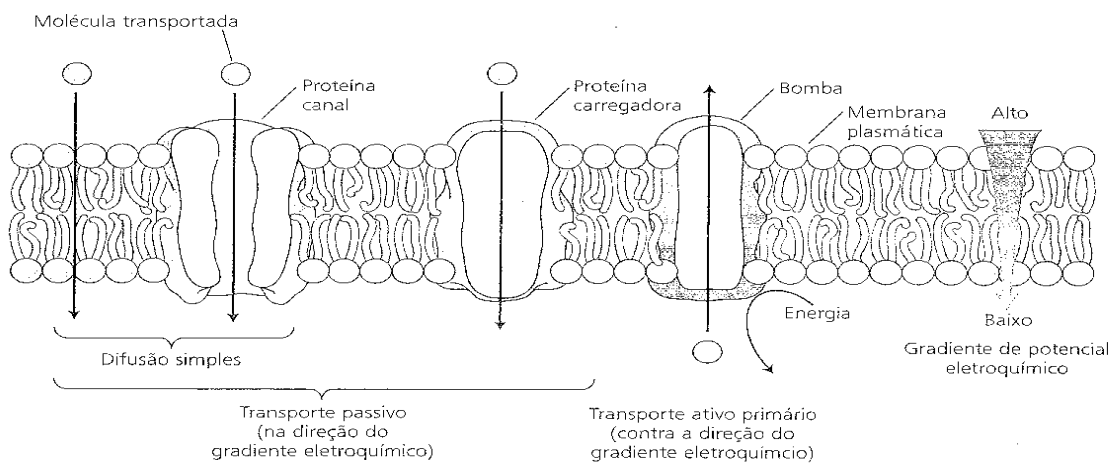


Figura 3.1: Esquema do transporte de nutrientes via modo canal e transportador (Taiz, 2004).

3.6. Distribuição de $^{137}Cs^+$, K^+ , and NH_4^+ nas plantas

Durante os últimos 150 anos, os cientistas têm estudado a nutrição das plantas com objetivos de compreender a absorção, acúmulo, transporte e as funções dos elementos químicos nas plantas. Além de potássio e sódio, já discutidos anteriormente, a planta pode transportar amônio, que consiste de um intermediário central no metabolismo do nitrogênio pelas plantas. O NH_4^+ , absorvido pelas raízes, também pode ser produzido por vários processos bioquímicos, incluindo a assimilação

de nitrato (NO_3^-), fotorrespiração, o metabolismo de fenil-propanóide, a degradação no transporte de amidas ou o catabolismo protéico. Supõe-se geralmente que a maioria do NH_4^+ gerado ou absorvido pelas raízes é assimilado e que apenas uma pequena parte é translocado para a parte aérea (Siebrecht e Tischner, 1999; Husted *et al.*, 2000; Anjos *et al.*, 2009a). Da mesma forma, acredita-se que o NH_4^+ gerado nas folhas é rápida e eficientemente assimilado e que a concentração de NH_4^+ no tecido foliar permanece, portanto, sempre muito baixa. No entanto, vários experimentos têm demonstrado a ocorrência de altas concentrações de NH_4^+ nos tecidos vegetais (Husted *et al.*, 2000). A deficiência de nitrogênio é acompanhada por incapacidade de sintetizar quantidades normais de clorofila, resultando em clorose das folhas mais velhas e quando a deficiência é grave, isto também ocorre nas folhas jovens. Em árvores frutíferas, a deficiência de nitrogênio pode estar associada a abscisão foliar, diminuição da produção de frutos, brotos pouco desenvolvidos e no início prematuro da geração de frutos maduros (Pallardy, 2008).

Césio é um metal alcalino fracamente hidratado com semelhanças físico-químicas ao potássio e ao sódio. O césio é predominantemente presente em solução como o cátion livre hidratado Cs^+ , com pouca ou nenhuma tendência para formar complexos solúveis. O césio pode ser facilmente absorvido da solução do solo pelas raízes das plantas e pode ser translocado para as partes aéreas do vegetal (Zhu e Smolders, 2000).

Informações sobre a absorção de césio pelas plantas em ambientes de clima temperado podem ser observadas na literatura. Assim como esperado para nutrientes vegetais, os resultados indicam que o césio tem uma grande mobilidade dentro de uma planta, podendo ser distribuído para os galhos, folhas, flores e frutos. Segundo Barci-Funel *et al.* (1995), que analisaram diferentes espécies de coníferas, a concentração de atividade de ^{137}Cs nas extremidades destas árvores tende a ser maior que nas partes internas de seus ramos principais. Isto indica um maior acúmulo deste elemento em direção às extremidades, onde as trocas de ar com o ambiente são mais fortes (força motriz da transpiração). Valores encontrados para as concentrações de ^{137}Cs nas cascas foram de uma ou duas ordens de grandeza maiores que nas partes internas da planta. Por outro lado, as concentrações nos galhos mais jovens (brotos)

eram 3 a 17 vezes maiores. Em outro estudo sobre pinheiros e abetos, Mc Gee *et al.* (2000) encontraram resultados semelhantes para as concentrações de ^{137}Cs nos brotos e galhos mais jovens das árvores, mas as concentrações nas cascas eram apenas cinco vezes maior. Fogh e Anderson (2001) obtiveram resultados semelhantes para pinheiros e carvalhos. Eles descobriram que partes de crescimentos (folhas, brotos, galhos e cascas) tinham atividades específicas de ^{137}Cs até uma ordem de grandeza superiores às das partes mais velhas da planta.

Estes resultados mostram que embora as concentrações de ^{137}Cs são maiores nas partes mais jovens das plantas, elas ainda são profundamente dependentes da espécie analisada. Isto mostra que é tão importante avaliar seu comportamento em diferentes espécies, quanto identificar sua semelhança com possíveis nutrientes vegetais. A partir destas observações, nosso Grupo começou a desenvolver pesquisa para plantas tropicais, já que a maioria dos estudos foram realizados para plantas de clima temperado, bem como buscar respostas para a compreensão do comportamento da incorporação do ^{137}Cs em vegetais.

Levando-se em conta que a capacidade das plantas em acumular íons (nutrientes vegetais) pode ser estimada através da comparação entre suas respectivas concentrações em diferentes partes ou órgãos da planta, é possível utilizar valores de razões ou taxas de concentrações de substâncias radioativas ou elementos estáveis para compreender como ocorrem suas incorporações. Para tanto, pode-se calcular a razão das concentrações destes elementos, normalizadas em relação a um dos compartimentos. Como a raiz principal é o órgão mais velho de uma dada planta, ele é um bom candidato e, portanto, a taxa de acúmulo de um dado elemento pode ser definida como sendo (Anjos *et al.*, 2009a):

$$CR_j = \frac{C_j}{C_{raiz}} \quad (3.1)$$

Onde C_j é a concentração do elemento j em um dado compartimento da planta (por exemplo, raiz principal, caule, cascas, galhos, brotos, folhas novas, folhas velhas, frutos verdes e frutos maduros). Para um dado radionuclídeo, C_j é a atividade por unidade de

massa seca ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$). Se o elemento é estável, C_j pode ser expresso, por exemplo, em partes por milhão (ppm). C_{raiz} representa a concentração do elemento na raiz principal da planta.

Nosso Grupo já realizou vários trabalhos em que foram medidas as concentrações de NH_4^+ livre e concentrações de atividade de ^{137}Cs e ^{40}K indo desde a raiz até as partes mais jovens para diversas espécies de árvores frutíferas lenhosas. Também foram avaliadas a capacidade de tais plantas tropicais em acumular esses íons (Mosquera *et al*, 2006; Sanches *et al*, 2008; Anjos *et al*, 2009). As Tabelas 3.2 e 3.3 mostram os resultados para laranjeiras (*Citrus sinensis*) e goiabeiras (*Psidium guajava*), respectivamente, realizadas por nosso Grupo (Anjos *et al*, 2009). A partir de seus valores, pode-se observar que os tecidos com baixa concentração de atividade de ^{137}Cs (com base no seu peso seco) possuem baixa concentração de atividade de ^{40}K . Do mesmo modo, observa-se que ^{137}Cs e ^{40}K apresentam simultaneamente concentrações mais elevadas nas partes mais jovens que nas partes mais antigas. Comportamento semelhante é observado para a distribuição de íons livres de NH_4^+ . No entanto, suas taxas de concentrações raiz-compartimento j ($\text{CR} [\text{Cs}]$, $\text{CR} [\text{K}]$ e $\text{CR} [\text{NH}_4]$) são dependentes da espécie vegetal. Por exemplo, os valores de $\text{CR} [\text{Cs}]$ e $\text{CR} [\text{K}]$ indicam que as folhagens da laranjeira possuem cerca de 7 vezes mais Cs e K que na raiz principal da planta, enquanto nas folhagens da goiabeira é apenas 2,5 vezes maior. Os valores de $\text{CR} [\text{NH}_4]$ indicam que os frutos de laranjeira possuem cerca de 1,1 vezes mais NH_4 que na raiz principal da planta, enquanto que nos frutos da goiabeira este valor é 1,9 vezes maior. Estes resultados indicam que as distribuições de ^{137}Cs , ^{40}K , e NH_4^+ também mostram pequenas variações em diferentes espécies de árvores frutíferas tropicais.

Tabela 3.2: Valores médios das concentrações de ^{137}Cs , ^{40}K e NH_4^+ e seus respectivos valores de (CR) para diversos compartimentos j de laranjeiras contaminadas por ^{137}Cs , extraídos de Anjos et al. (2009). O valor em parênteses representa o desvio padrão.

Laranjeira (<i>Citrus sinensis</i>)							
j	Compartimento	Concentração			Taxas de concentração		
		^{137}Cs (Bq.kg ⁻¹)	^{40}K (Bq.kg ⁻¹)	NH_4^+ (ppm)	CR[C _s]	CR[K]	CR[NH ₄]
1	Raiz principal	169(12)	100(10)	1,5(0,1)	1,0(0,1)	1,0(0,1)	1,0(0,1)
2	Caule principal	174(10)	102 (9)	1,5(0,1)	1,0(0,1)	1,0(0,1)	1,0(0,1)
3	Casca	774(68)	400 (32)	2,5(0,3)	4,4(0,5)	3,9(0,5)	1,7(0,2)
4	Galho	289(25)	177 (23)	1,8(0,1)	1,7(0,2)	1,7(0,3)	1,2(0,1)
5	Ramo	691(56)	331 (26)	1,6(0,1)	4,0(0,4)	3,2(0,4)	1,1(0,1)
6	Folha velha	1178(88)	675 (60)	3,2(0,3)	6,8(0,6)	6,6(0,8)	2,1(0,2)
7	Folha nova	1290(109)	711 (69)	4,7(0,2)	7,4(0,8)	7,0(0,9)	3,1(0,2)
8	Fruto maduro	600 (46)	336 (36)	0,70(0,07)	3,4(0,3)	3,3(0,5)	0,47(0,07)
9	Fruto verde	658 (64)	353 (38)	1,6(0,3)	3,8(0,4)	3,5(0,5)	1,1(0,2)

Além disso, os resultados das Tabelas 3.2 e 3.3 mostram que para árvores frutíferas tropicais, as concentrações de ^{137}Cs nas partes mais jovens das plantas foram apenas cerca de 2 a 7 vezes superiores que nas partes mais velhas das plantas, sugerindo que a distribuição de ^{137}Cs em árvores frutíferas tropicais apresentam pequenas variações quando comparadas com coníferas ou árvores de floresta temperada.

Analisando o comportamento comparativo das concentrações de ^{137}Cs , ^{40}K e NH_4^+ nestas árvores através de suas taxas de concentrações (CR [Cs], CR [K], e CR [NH₄]) em diferentes partes ou compartimentos das plantas, pode-se ver que Cs⁺ apresenta melhor semelhança com K⁺ que NH₄⁺. Os valores de CR [Cs] e CR [K] são praticamente idênticos em diferentes compartimentos de cada planta. Diferenças significativas nos

valores de CR[NH₄] são observadas, revelando, portanto, que Cs⁺ e íons livres de NH₄⁺ apresentam taxas de acúmulo distintas em alguns órgãos destas plantas.

Tabela 3.3: Valores médios das concentrações de ¹³⁷Cs, ⁴⁰K e NH₄⁺ e seus respectivos valores de (CR) para diversos compartimentos j de goiabeiras contaminadas por ¹³⁷Cs, extraídos de Anjos et al. (2009). O valor em parênteses representa o desvio padrão.

Goiabeira (<i>Psidium guajava</i>)							
j	Compartimento	Concentração			Taxas de concentração		
		¹³⁷ Cs (Bq.kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq.kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ (ppm)	CR[Ces]	CR[K]	CR[NH ₄]
1	Raiz principal	860(70)	195(17)	15(1)	1,0(0,1)	1,1(0,1)	1,1(0,1)
2	Caule principal	835(65)	174(16)	13(1)	1,0(0,1)	1,0(0,1)	1,0(0,1)
3	Casca	2425(230)	436(28)	23(2)	2,9(0,4)	2,5(0,3)	1,8(0,2)
4	Galho	1275(125)	244(33)	15(1)	1,5(0,2)	1,4(0,2)	1,2(0,1)
5	Ramo	1216(102)	277(19)	14(1)	1,5(0,2)	1,6(0,2)	1,1(0,1)
6	Folha velha	1493(104)	265(19)	16(1)	1,7(0,2)	1,5(0,2)	1,2(0,1)
7	Folha nova	2144(262)	394(36)	12(1)	2,6(0,4)	2,3(0,3)	0,9(0,1)
8	Fruto maduro	1933(162)	413(33)	1,7(0,1)	2,3(0,3)	2,4(0,3)	0,13(0,01)
9	Fruto verde	2157(265)	466(52)	25(7)	2,6(0,4)	2,7(0,4)	1,9(0,6)

Diante deste fato, é interessante avaliar como é o comportamento de ¹³⁷Cs em relação do Na, outro elemento que é benéfico para algumas plantas tropicais.

3.7. Modelo para a incorporação de K⁺, ¹³⁷Cs⁺ e Na⁺ em frutos

O tempo necessário para o crescimento do fruto varia muito entre espécies e genótipos. O período entre o florescimento e o amadurecimento dos frutos pode variar de cerca de quatro semanas para pimentas até 40 semanas para cocos. Assim, os frutos crescem com diferentes taxas, atingindo diferentes tamanhos na maturidade. O crescimento de frutos envolve vários graus de divisão e expansão celular. Durante o florescimento, há pouca divisão celular. Depois que o fruto é definido, no entanto, ele

torna-se um dissipador ativo de carboidratos e muitos de seus tecidos se tornam meristemáticos (Pallardy, 2008).

Segundo Carini *et al.* (2011) e Palardy (2008), as curvas de crescimento de frutos podem ser de dois tipos. O primeiro tipo inicia com um crescimento exponencial e em seguida retarda para uma forma sigmóide (Figura 3.2).

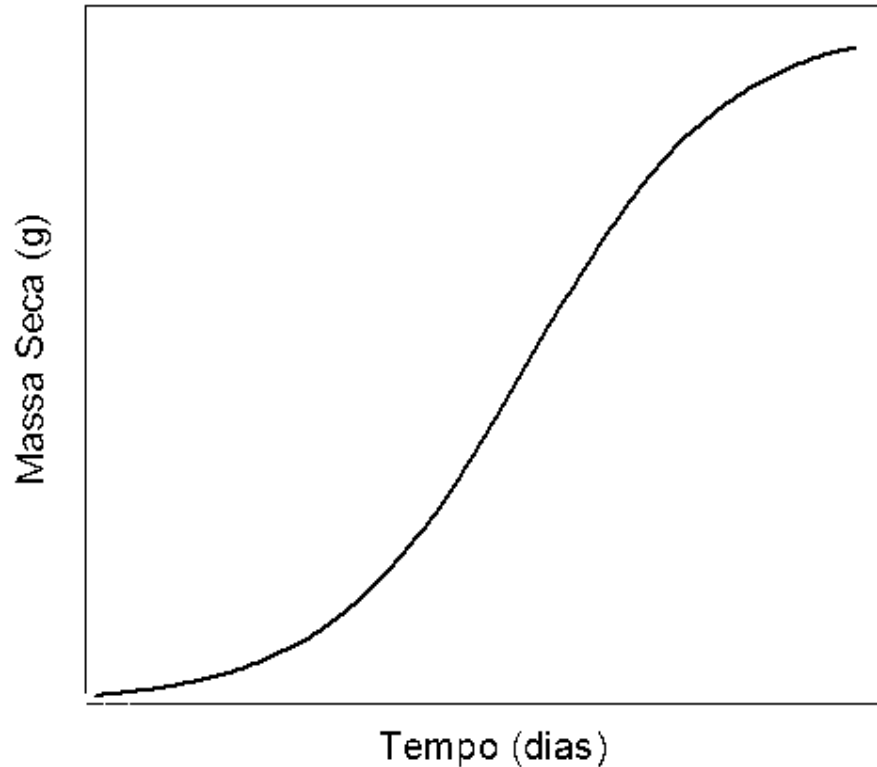


Figura 3.2: Curva sigmóide para o crescimento de frutos (Pallardy, 2008).

Tal curva de crescimento é comum para muitos tipos de frutos, incluindo as maçãs, peras, laranjas, bananas, mamões, morangos, mangas, cocos e limões. A forma precisa da curva varia em função da planta estudada. O segundo tipo é uma curva de crescimento mais complexa envolvendo dois períodos de rápido crescimento com um período de lento crescimento suspenso entre eles. Este tipo de curva é representado por cerejas, damascos, azeitonas, ameixas, pêssegos e café.

O nosso grupo de pesquisa desenvolveu um modelo de curvas temporais para a evolução da massa e da incorporação de K^+ , Na^+ e $^{137}Cs^+$ durante o período de crescimento e maturação dos frutos em plantas frutíferas tropicais. O modelo desenvolvido apresenta duas simplificações: a taxa de crescimento dos frutos e a concentração de atividade no solo dos elementos estudados durante o período de coleta foram consideradas constantes. Isto é razoável, pois não se espera variações significativas nas concentrações dos elementos estudados durante o período de crescimentos de frutos (no máximo, 7 meses).

Para o nosso modelo foram considerados apenas os frutos por dois motivos principais: primeiro, porque o fruto representa como já dito anteriormente, o compartimento onde há o maior acúmulo de potássio e céσιο. Segundo porque estudar o problema de absorção e translocação dos nutrientes vegetais é um problema muito complexo e para entendê-lo de forma mais eficaz é melhor partir de simplificações para depois universalizar o conhecimento.

Além disso, lembrando-se que o potássio é o principal cátion intracelular, ele se apresenta dissolvido na solução do citosol (líquido que preenche o citoplasma ou o espaço entre a membrana plasmática e o núcleo), organelas (cloroplastos e mitocôndrias) e especialmente em vacúolos (Barker e Pilbean, 2007). Com base nesta distribuição, é possível associar que quanto maior o teor de K num tecido mais água ele contém. Se a concentração deste elemento nos tecidos vegetais, órgãos da planta ou na planta como um todo é expressa em termos de seu peso fresco, variações na concentração podem ser imperceptíveis. Assim, com o objetivo de evitar esse problema, o valor da massa usado para determinar a concentração dos nutrientes vegetais em nosso modelo é expresso em termos da massa seca do órgão ou tecido vegetal.

3.7.1. Modelo para a curva de crescimento dos frutos

O crescimento dos frutos segundo nosso modelo obedece a seguinte equação diferencial:

$$\frac{dM}{dt} = \alpha M(t)(M_m - M(t)) \quad (3.2)$$

Onde M é a massa seca expressa em gramas; t é o tempo dado em dias; α é razão máxima de crescimento (d^{-1}) e; M_m é o valor máximo de M(t). A solução da equação 3.1 é dada pela seguinte expressão:

$$M(t) = \frac{M_0 M_m}{(M_m - M_0) \exp^{-\alpha t} + M_0} \quad (3.3)$$

Podemos ver que, quando fazemos $t \rightarrow \infty$ a massa satura. Quando $t = 0$, então, $M = M_0$. Quando M_m é muito maior que M_0 temos um comportamento tipicamente exponencial.

3.7.2. Modelo para a incorporação de K^+ , Na^+ e $^{137}Cs^+$

O comportamento dos elementos K^+ , Na^+ e $^{137}Cs^+$ segundo nosso modelo obedece a seguinte equação:

$$\frac{dC_i}{dt} = -\beta(C_i - C_i^{min}) \quad (3.4)$$

Onde C_i é a concentração do íon i no fruto dado em g/kg; $i = K^+$, Na^+ e $^{137}Cs^+$; β é o parâmetro de decrescimento exponencial dado em d^{-1} e; C_i^{min} é o valor mínimo de $C_i(t)$ dado em $g \text{ kg}^{-1}$. A solução da equação 3.3 é dada pela seguinte expressão:

$$C_i(t) = C_{Fr} \exp^{-\beta t} - C_i^{min} \quad (3.5)$$

onde:

$$C_{Fr} = C_i(0) - C_i^{min} \quad (3.6)$$

Podemos ver que usando $t \rightarrow \infty$ então $C_i = C_{imin}(0)$. Quando $t = 0$ então $C_i = C_i(0)$. Multiplicando as Equações 3.3 e 3.5 podemos obter a quantidade em gramas A do íon i incorporado pelo fruto.

$$A(t) = M(t) \times C(t) \quad (3.7)$$

3.8. Fator de transferência solo-planta

A absorção de radionuclídeos pelas plantas é geralmente avaliada usando fatores de transferência solo-planta (F_v). Este é calculado como a razão entre a concentração de atividade em um dado órgão ou compartimento (caule, folha, fruto, etc) de uma dada planta e a concentração de atividade na superfície do solo. Para tanto, os valores das concentrações são assumidos como constante ao longo do tempo. A concentração de atividade é expressa em Bq/kg e o F_v é adimensional.

$$F_v = \frac{C_{\text{compartimento}}}{C_{\text{solo}}} \quad (3.8)$$

O F_v é simplesmente um valor percentual para a absorção de um determinado elemento presente no solo feita pela planta. Este fator é muito importante para trabalhos de radioecologia e proteção ambiental. Conhecendo-se F_v é possível, por exemplo, determinar a taxa de dose interna associada ao consumo de um dado fruto cultivado em uma região onde tenha ocorrido uma emergência radiológica ou nuclear. Assim, é possível determinar frutos que podem ser ingeridos ou não pela população sem comprometimento da saúde.

Inúmeros trabalhos realizados ao redor do mundo tiveram como foco determinar o fator de transferência de alguns radionuclídeos para frutos de diversas plantas. Esses trabalhos estão concentrados, em sua maior parte, para plantas cultivadas em clima temperado, ou seja, no hemisfério norte, dando origem a uma publicação da Agência Internacional onde estão compilados muitos dos resultados encontrados. Esta publicação é conhecida como IAEA TRS 364.

O fator de transferência, contudo, depende de inúmeras variáveis dificultando, portanto, o estabelecimento de generalizações. Dentre essas variáveis, é observado que eles são muito dependentes das propriedades macroscópicas do solo. Normalmente, os fatores de transferência encontrados na literatura apresentam uma variabilidade, particularmente para árvores frutíferas, de tal forma que valores observados para um mesmo compartimento de uma dada planta chegam a ter valores significativamente diferentes, variando de várias ordens de grandeza.

Neste sentido, este trabalho também pretende averiguar qual a influência do tamanho do fruto durante o seu processo de maturação no fator de transferência solo-fruto.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais e as principais discussões sobre o comportamento de K^+ , Na^+ e $^{137}Cs^+$ durante o processo de crescimento e maturação de frutos de duas espécies tropicais.

Serão apresentados em forma de tabela os valores experimentais encontrados para as grandezas de massa seca, diâmetro, idade e concentrações dos elementos K, Na e ^{137}Cs para os frutos coletados em Itaipuaçu, Itaipu e Goiânia. Também serão apresentados os gráficos experimentais obtidos para a evolução temporal destes parâmetros bem como as curvas ajustadas pelo modelo teórico proposto.

Estudos sobre o transporte e absorção do potássio e do $^{137}Cs^+$ em alguns compartimentos ou órgãos de algumas plantas tropicais já tinham sido realizados anteriormente pelo nosso Grupo (Anjos *et al.*, 2008, 2009a, 2009b; Sanches *et al.*, 2008), onde alguns comportamentos observados já foram apontados na introdução dessa dissertação. Os resultados indicavam que órgãos jovens de árvores frutíferas lenhosas tendem a incorporar uma maior quantidade destes elementos quando comparados com seus órgãos mais velhos. Contudo, até então, não havia sido feito uma análise do comportamento destes elementos ao longo de um ciclo completo de desenvolvimento de um órgão específico. Assim, decidimos compreender o comportamento destes elementos nos frutos de plantas tropicais. Sua escolha foi por ser um órgão jovem com grande capacidade de acumular estes elementos e com grande interesse na cadeia alimentar. A constatação do uso de um traçador neste órgão permite a evolução de vários estudos tanto de interesse da fisiologia de plantas

quanto na avaliação de impactos naturais ou antrópicos em agroecossistemas, uma vez que qualquer perturbação que altere o transporte de nutrientes em plantas poderia ser identificada com uso de marcadores ou traçadores vegetais.

4.1. Cátions monovalentes em limões

A Tabela 4.1 apresenta a evolução temporal do diâmetro, porcentagem de água, massa e concentrações de K e Na nos frutos dos limoeiros cultivados em solo não contaminado por ^{137}Cs , portanto são amostras coletadas em Niterói e Maricá. A contagem do tempo para cada fruto iniciou-se a partir do dia floração (tempo zero). Devido a incerteza temporal entre o período de floração e início de frutificação foi atribuído um erro associado ao tempo de 7 dias, visando levar em conta esta incerteza.

Tabela 4.1: Dados experimentais dos limões não contaminados por ^{137}Cs medidos por NAA.

Idade dos frutos (dias)*	Diâmetro (mm)	% de água	Massa seca (g)	^{40}K (Bq/kg)	K (g/kg)	Na (g/kg)
16 ± 7	8 ± 1	79 ± 8	0,12 ± 0,05	805 ± 105	25 ± 3	0,04 ± 0,01
31 ± 7	13 ± 2	74 ± 7	0,5 ± 0,2	637 ± 48	20 ± 2	0,06 ± 0,02
49 ± 7	17 ± 2	73 ± 7	0,9 ± 0,2	482 ± 57	15 ± 2	0,09 ± 0,01
55 ± 7	18 ± 3	80 ± 7	3,1 ± 0,5	422 ± 38	13 ± 1	0,17 ± 0,03
71 ± 7	32 ± 5	82 ± 8	3,9 ± 0,8	440 ± 25	14 ± 1	0,19 ± 0,05
87 ± 7	36 ± 5	83 ± 8	5,2 ± 0,6	422 ± 51	13 ± 2	0,35 ± 0,03
113 ± 7	38 ± 6	86 ± 9	7 ± 1	407 ± 44	12 ± 1	0,32 ± 0,03
129 ± 7	52 ± 8	88 ± 9	10 ± 1	365 ± 35	12 ± 1	0,42 ± 0,03
158 ± 7	60 ± 9	89 ± 9	19 ± 2	437 ± 48	14 ± 2	0,51 ± 0,03
165 ± 7	63 ± 9	88 ± 9	17 ± 2	431 ± 47	14 ± 2	0,67 ± 0,03

*o erro associado com o tempo (7 dias) visa levar em conta a incerteza temporal entre o período de floração e início da frutificação.

De acordo com esta tabela, nota-se que durante o processo de maturação dos limões, a sua massa fresca aumentou de 0,56 a 159 g, correspondendo a uma variação em sua massa seca entre $0,12 \pm 0,05$ g a 17 ± 1 g, indicando que a porcentagem média do teor de água dos limões variou de 79 ± 8 % a 89 ± 8 %. Devido ao fato de que ^{40}K e ^{40}K possuem as mesmas propriedades físico-químicas, as concentrações de atividade de ^{40}K podem ser convertidas em potássio total (K) e vice-versa, utilizando-se a Equação (2.14). Isto nos permite estudar o comportamento da quantidade de potássio total no interior dos frutos. Similarmente, é possível transformar a concentração de atividade de ^{137}Cs , expressa em Bq/kg, em g/kg.

A Tabela 4.2, por sua vez, mostra os dados referentes aos frutos coletados em solo contaminado por ^{137}Cs , portanto são amostras coletadas em Goiânia. Analisando-se os resultados apresentados nesta tabela em conjunto com a Tabela 4.1, nota-se que o potássio foi consumido em grandes quantidades, de modo que a concentração de atividade de ^{40}K variou de 407 ± 44 a 805 ± 105 Bq/kg. Representando uma quantidade de potássio total de 12 ± 1 a 25 ± 3 g/kg. Na foi consumido em pequenas quantidades, variando de $0,04 \pm 0,01$ a $0,67 \pm 0,03$ g/kg. Por outro lado, as concentrações de atividade de ^{137}Cs variaram de 82 ± 12 a 209 ± 25 Bq/kg.

Tabela 4.2: Dados experimentais dos limões contaminados por ^{137}Cs medidos por espectrometria gama.

Idade dos frutos (dias)	^{137}Cs (Bq/kg)	$^{137}\text{Cs}(\text{g/kg}) \times 10^{-11}$	^{40}K (Bq/kg)	K (g/kg)
20 ± 7	209 ± 25	$6,5 \pm 0,8$		
60 ± 7	114 ± 15	$3,6 \pm 0,5$		
90 ± 7	92 ± 13	$2,9 \pm 0,4$	440 ± 60	14 ± 2
120 ± 7	83 ± 12	$3,9 \pm 0,8$	396 ± 55	13 ± 2
140 ± 7	76 ± 12	$3,8 \pm 0,8$	383 ± 50	12 ± 2

160 ± 7	82 ± 12	3,9 ± 0,8	395 ± 52	12 ± 2
---------	---------	-----------	----------	--------

**o erro associado com o tempo (7 dias) visa levar em conta a incerteza temporal entre o período de floração e início da frutificação.*

Aplicando-se novamente a Equação (2.14), nota-se que estes valores correspondem a uma quantidade entre $(2,9 \pm 0,4 \text{ a } 6,5 \pm 0,8) \times 10^{-11} \text{ g/kg}$ de ^{137}Cs . Estes resultados indicam que mesmo numa situação de um terreno contaminado, a parcela de ^{137}Cs que é absorvida pela planta pode ser considerada como traço em relação à quantidade absorvida de potássio ou sódio.

Analisando-se ainda as Tabelas 4.1 e 4.2 nota-se que a distribuição de potássio na planta contaminada por ^{137}Cs em relação a planta não contaminada são muito semelhantes. Isto é devido a dois fatores. O primeiro é que a quantidade de potássio no solo é igual nos dois lugares onde as plantas foram cultivadas. Em Itaipuaçu a concentração era de $(792 \pm 32) \text{ Bq/kg}$, enquanto em Goiânia era de $(761 \pm 63) \text{ Bq/kg}$. Em segundo, é que os resultados sugerem que a distribuição de K não sofre alteração devido à distribuição do ^{137}Cs na planta. Isto parece estar relacionado com a ínfima quantidade de Cs que é absorvida perante o K.

Indo um pouco mais além, nota-se que tanto a incorporação do K^+ quanto a de $^{137}\text{Cs}^+$ são dependentes da idade do fruto. Contudo suas distribuições tendem a diminuir à medida que o fruto cresce, ou seja, vai se tornando mais velho. Por outro lado, a incorporação de Na^+ tem um comportamento inverso, aumentando à medida que o fruto cresce. Estes comportamentos podem ser mais bem visualizados através de gráficos temporais dos principais parâmetros envolvidos no processo de crescimento dos limões.

A Figura 4.1 apresenta a curva de crescimentos dos limões. A partir dela pode-se notar que a massa seca do fruto aumenta durante seu período de crescimento e maturação até tender a uma saturação de seu tamanho. Aplicando-se o Modelo proposto por nosso Grupo, através de um ajuste dos dados experimentais pela Equação (3.3), nota-se um bom acordo entre os dados e o comportamento de uma curva sigmóide para o crescimento dos frutos. Assim, este é um primeiro teste positivo para a aplicação de nosso modelo.

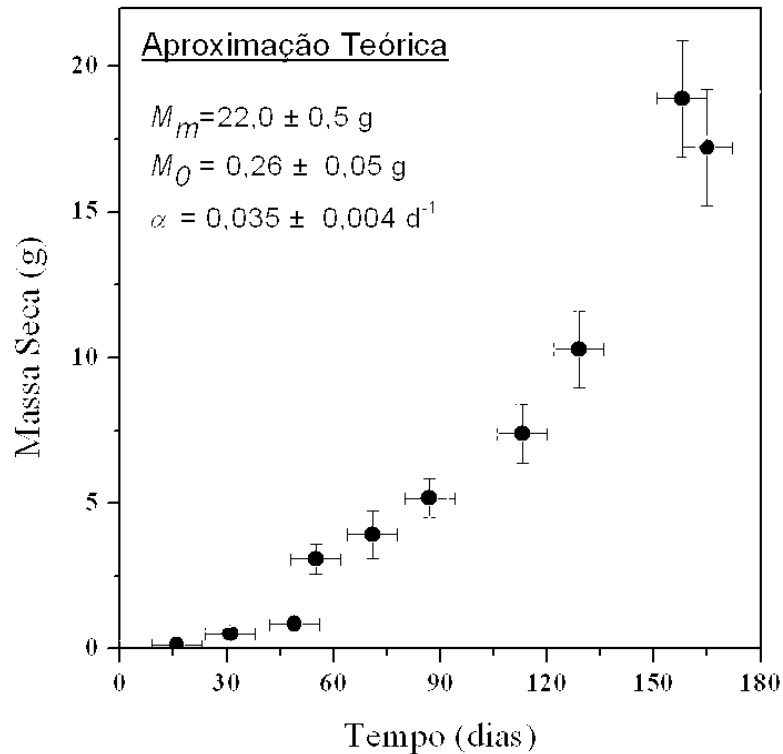


Figura 4. 1: Curva de crescimento para limões. A curva vermelha representa um ajuste utilizando-se a Equação (3.3), com $R^2=0.97$. A Legenda apresenta os valores dos parâmetros ajustados.

A Figura 4.2 apresenta a evolução temporal das concentrações de K e Na durante o processo de crescimento dos frutos. Nota-se que enquanto a concentração de K diminui de forma exponencial, a concentração de Na aumenta de forma constante com o crescimento dos frutos. Assim, K e Na apresentam padrões de comportamento distintos nesta espécie de planta. Este comportamento parece indicar também que à medida que o fruto cresce, a planta começa a redistribuir o potássio para outros compartimentos, dando nova função para o potássio. Entretanto, isto parece não ocorrer para o sódio, indicando que seu comportamento parece não ser tão benéfico para a planta quanto o potássio.

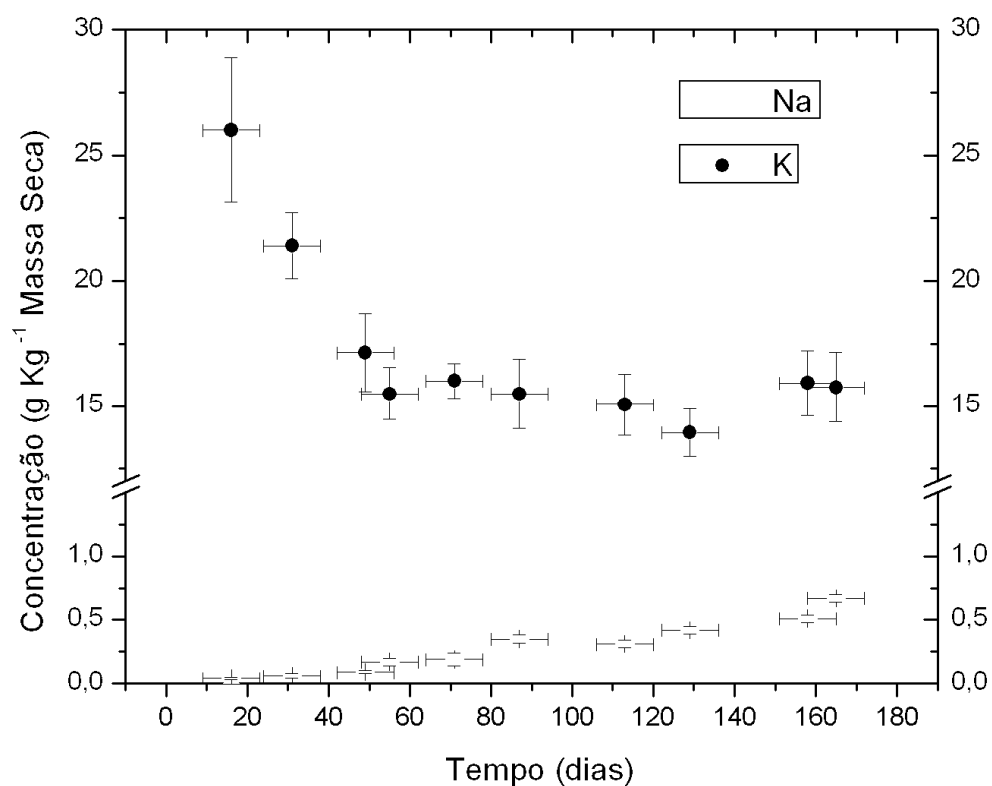


Figura 4. 2: Evolução temporal da concentração de sódio e potássio nos limões.

A Figura 4.3 apresenta a evolução temporal das concentrações de ^{137}Cs durante o processo de crescimento dos frutos. Nota-se que as concentrações de ^{137}Cs e K apresentam comportamentos semelhantes, tendendo a decrescer de forma exponencial à medida que o fruto cresce. Tal correlação indica que o potássio poderia servir de traçador para o céσιο e vice-versa. Assim é possível conhecer, por exemplo, o comportamento do ^{137}Cs em ecossistemas não contaminados medindo concentrações de potássio nos frutos.

A partir da sobreposição ou normalização dos valores experimentais dispostos nas Figuras 4.2 e 4.3 foi construída a Figura 4.4. Esta por sua vez exibe a curva obtida pelo ajuste da Equação (3.5), oriunda do modelo proposto neste trabalho para a evolução temporal da concentração de cátions monovalentes inorgânicos presentes em plantas. É interessante observar que o ajuste foi muito satisfatório. O parâmetro β , característico de uma função exponencial decrescente, possui o mesmo valor em ambos os casos ($\beta = 0,05 \pm 0,01 \text{ d}^{-1}$), confirmando que a planta apresenta mecanismos

semelhantes para a incorporação de ambos os cátions em seus frutos (Delvaux *et al.*, 2000; White and Broadley, 2000; Zhu and Smolders, 2000). Essa correlação positiva entre as concentrações de atividade de ^{137}Cs e ^{40}K em frutos também confirma os resultados prévios obtidos por nosso Grupo (Mosquera *et al.*, 2006; Sanches *et al.*, 2008; Anjos *et al.*, 2009a, 2009b).

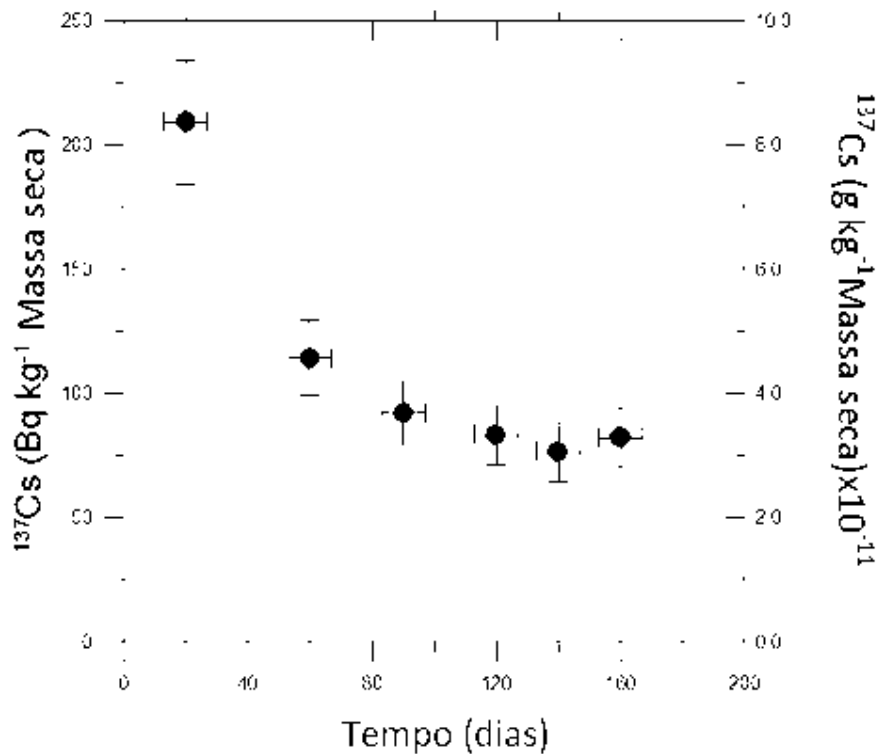


Figura 4. 3: Evolução temporal da concentração de césio em limões.

Para conhecer a quantidade de $^{137}\text{Cs}^+$ e K^+ incorporada pelos frutos basta simplesmente multiplicar os valores das massas secas por suas respectivas concentrações. A Equação (3.7) fornece esta taxa de incorporação. A partir dos valores encontrados, foi construída a Figura 4.5. Esta figura mostra que a quantidade de K^+ e $^{137}\text{Cs}^+$ aumentam ao longo de todo o período de desenvolvimento do fruto, apesar da concentração diminuir. A concentração diminui porque a curva de crescimento dos frutos (Figura 4.1) aumenta mais rapidamente que a curva de incorporação dos elementos pelos frutos.

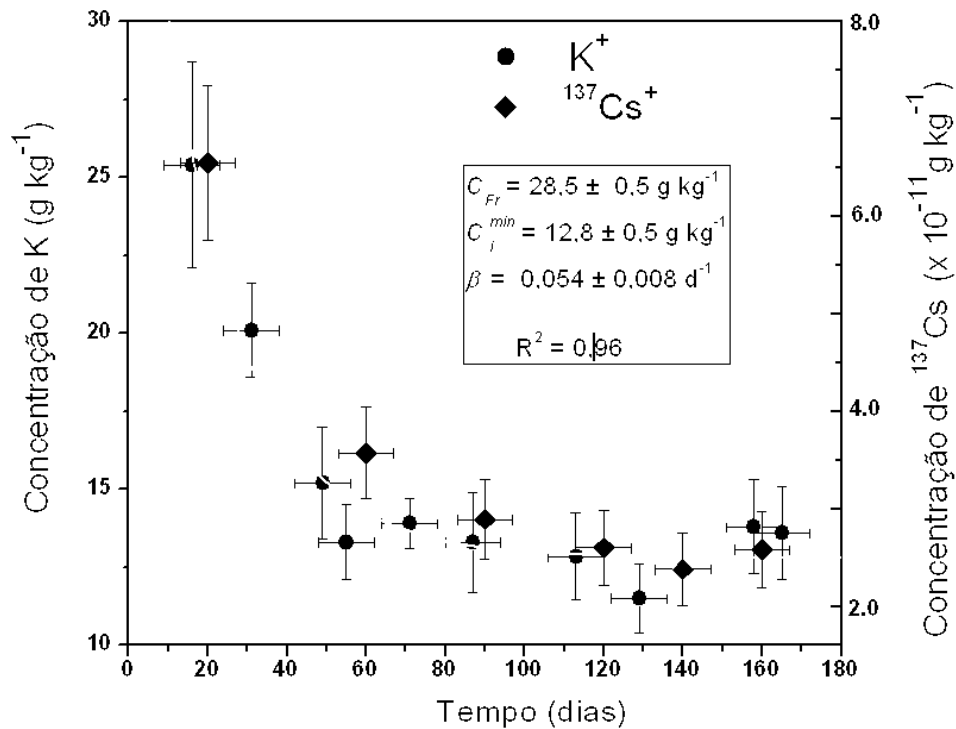


Figura 4. 4: Evolução temporal da incorporação de potássio e césio em limões. A curva vermelha representa o ajuste realizado por nosso Modelo (Equação 3.4) e a legenda representa os principais parâmetros obtidos a partir deste ajuste.

A derivada temporal da função $A(t)$, dada pela Equação (3.7) e apresentada na Figura 4.5, nos dá a taxa de incorporação nos frutos. A taxa de incorporação de K e ^{137}Cs nos limões sugere que há uma maior preferência dos frutos em absorver K que ^{137}Cs durante o seu período de crescimento. Shaw e Bell (1989) têm relatado que embora o mesmo mecanismo de transporte esteja presente na transferência de K^+ e Cs^+ para o fruto, diferenças nas taxas de absorção poderiam indicar que as plantas possuem uma capacidade em discriminar estes dois íons, dando preferência ao potássio. No entanto, se lembrarmos que a quantidade de potássio disponível é consideravelmente superior à de césio, não é possível fazer esta afirmação apenas analisando-se a Figura 4.5. Para tanto, é necessário analisarmos o fator de transferência solo-fruto para estes elementos (esta discussão será feita na Seção 4.3).

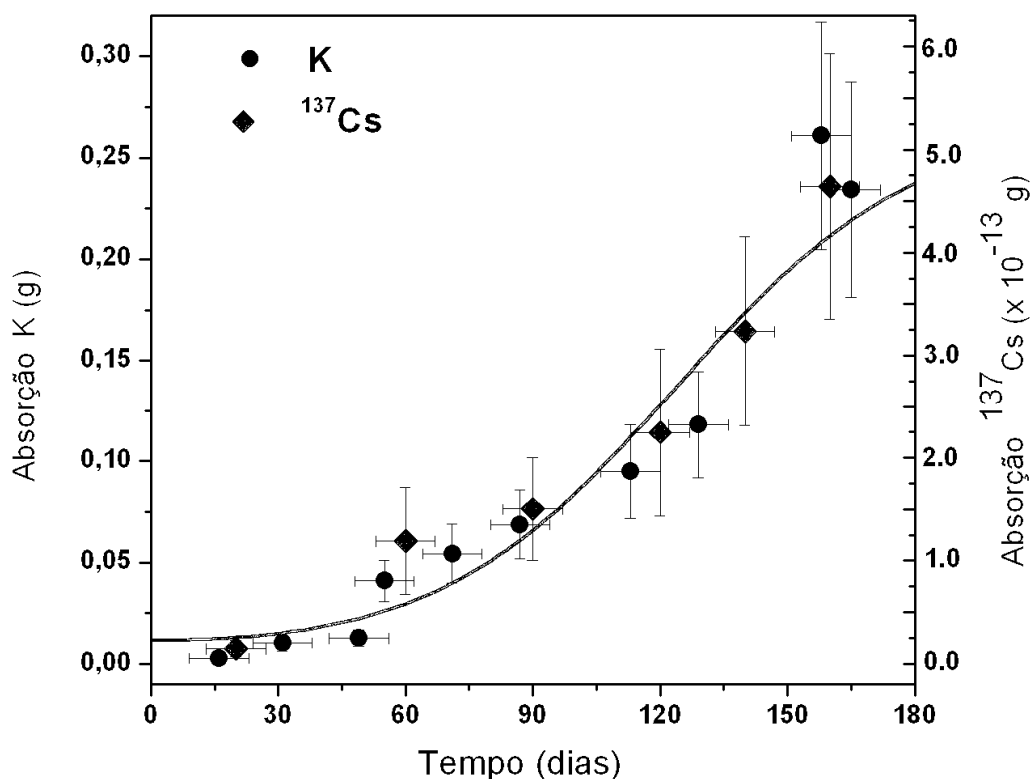


Figura 4. 5: Evolução temporal da incorporação da quantidade de potássio e césio em limões. A curva vermelha representa a aplicação da Equação (3.7).

4.2. Cátions monovalentes em cocos

A interpretação feita para os resultados das concentrações de ^{137}Cs , K e Na para cocos é muito semelhante àquela feita na secção anterior para limões. Assim, vamos nos preocupar aqui em evidenciar as diferenças observadas entre cocos e limões.

A Tabela 4.3 apresenta a evolução temporal do diâmetro, porcentagem de água, massa e concentrações de K e Na nos frutos dos coqueiros cultivados em solo não contaminado por ^{137}Cs , portanto são amostras coletadas em Niterói. A contagem do tempo para cada fruto iniciou-se a partir do dia floração (tempo zero). Devido à incerteza temporal entre o período de floração e início de frutificação foi atribuído um erro associado ao tempo de 7 dias, visando levar em conta esta incerteza. Dentre os 27 valores experimentais apresentados nesta tabela apenas 12 foram medidos por ativação neutrônica. Para o potássio, a maioria das amostras foram analisadas por

espectrometria gama. Isto foi possível devido ao grande tamanho dos frutos. Por outro lado, possuímos apenas 12 valores da concentração de sódio.

Tabela 4.3: Dados experimentais dos cocos.

Idade dos frutos (dias)	Diâmetro (mm)	% de água	Massa seca (g)	⁴⁰ K (Bq/kg)	K (g/kg)	Na (g/kg)
3±3	15±3	81± 8	0,71±0,07	800 ± 50	25± 2	1,38±0,01
7±7	20±5	82± 8	1,1±0,1	798 ± 50	25±2	1,31±0,08
14±7	25± 5	81± 8	2,1± 0,2	767 ± 45	24±1	
21±7	28± 5	82± 8	2,4± 0,3	750 ± 50	24±2	
24±7	32± 5	83± 8	3,8±0,4	736 ± 50	23±2	1,20±0,07
28±7	35± 5	83± 8	5,4±0,6	727 ± 45	23±1	
35±7	40± 6	83± 8	6,7±0,7	717 ± 45	23±1	1,20±0,07
42±7	44± 6	84± 8	8,1±0,9	686 ± 45	22±1	
50±7	46± 6	82± 8	10±1	675 ± 45	21±1	
57±7	50± 6	84± 8	13±1	653 ± 45	21±1	1,0±0,06
72±7	55± 8	85± 8	15±2	612 ± 40	19±1	0,91±0,06
82±7	60± 8	87± 9	22±2	625 ± 40	20±1	0,85±0,06
88±7	65± 8	87± 9	25±3	625 ± 45	20±1	0,86± 0,06
93±7	70± 8	88± 9	30±3	580 ± 45	18±1	0,80± 0,05
100±7	75± 8	89± 9	36±4	582 ± 40	18±1	
107±7	82± 9	89± 9	42±5	565 ± 40	18±1	
119±7	95± 10	88± 9	48±5	555 ± 40	18±1	
129±7	100± 10	89± 9	56±6	532 ± 40	17±1	
136±7	105± 12	90± 9	63±7	502 ± 40	16±1	0,66±0,04
143±7	110± 12	87± 9	72±8	460 ± 40	15±1	0,65±0,04
150±7	124± 12	90± 9	82±9	457 ± 35	14±1	
172±7	130± 15	92± 9	106±12	480 ± 40	15±1	
180±7	140± 15	91± 9	123±14	494 ± 40	16±1	
185±7	150± 15	92± 9	130±14	500 ± 50	16±2	
190±7	160± 15	91± 9	135±15	483 ± 50	15±2	
210±7	170± 16	92± 9	140±15	485 ± 50	15±2	0,54±0,04
250±7	170± 16	92± 9	141±15	480 ± 50	15±2	

De acordo com a Tabela 4.3, nota-se que durante o processo de maturação dos cocos, a sua massa fresca aumentou de 3,4 g a 1,8 kg, correspondendo a uma variação em sua massa seca entre $0,71 \pm 0,07$ a 141 ± 15 g, indicando que a porcentagem média do teor de água dos cocos variou de 81 ± 8 % a 92 ± 9 %. Durante o processo de crescimento e maturação de cocos, K^+ foi incorporado em grandes quantidades,

estando presente em tecidos do fruto em quantidades de 14 ± 1 a 25 ± 2 g/kg. Já os níveis de Na^+ foram de $0,54 \pm 0,04$ a $1,38 \pm 0,01$ g/kg. Estes resultados indicam novamente que as concentrações de K e Na são dependentes da idade dos frutos. Além disso, o acúmulo de Na nos tecidos dos frutos é proporcional à concentração de K, ou seja, diminui à medida que o fruto cresce. Apesar da diminuição das concentrações de Na com o tempo, os resultados indicam que os cocos podem acumular quantidades substanciais de sódio em comparação com limões (veja Tabela 4.1). Este comportamento antagônico de Na confirma que seus efeitos benéficos sobre o crescimento dos frutos difere consideravelmente entre espécies de plantas. A concentração de Na necessária para causar um efeito benéfico durante o processo de amadurecimento dos limões, são baixos. Desta forma, o coqueiro pode ser considerado uma "espécie de médio a altos valores de Na", onde o efeito benéfico de Na é importante no crescimento da planta. Nesta espécie, Na contribui para o potencial osmótico da célula e, portanto, tem um efeito positivo sobre o regime hídrico da planta (Mengel e Kirkiby, 2001).

Infelizmente, não há coqueiros contaminados com $^{137}\text{Cs}^+$ disponíveis na região de Goiânia, de tal modo que pudéssemos coletar amostras de cocos. No entanto, Robison *et al.* (2009) têm relatado que a concentração de ^{137}Cs em órgãos ou compartimentos jovens de coqueiros diminui com o seu desenvolvimento. Este mesmo comportamento tem sido observado para o potássio. A Figura 4.6 ilustra este comportamento observado por Robison e colaboradores. Estes resultados sustentam, assim, a hipótese de que $^{137}\text{Cs}^+$ e K^+ comportam-se de modo semelhante durante o processo de crescimento de cocos. Desta forma, podemos sugerir que em espécies de palmeiras, os íons de Na^+ podem ser incorporados de forma semelhante aos íons de $^{137}\text{Cs}^+$ e K^+ em suas partes comestíveis.

Analogamente ao realizado no estudo dos limões, a seguir serão apresentados os comportamentos temporais dos principais parâmetros envolvidos no processo de crescimento dos cocos. A Figura 4.7 apresenta a curva de crescimentos dos cocos. Aplicando-se o Modelo proposto por nosso Grupo, através de um ajuste dos dados experimentais pela Equação (3.3), nota-se um bom acordo entre os dados e o

comportamento de uma curva sigmóide para o crescimento dos cocos. Novamente temos um teste positivo para a aplicação de nosso modelo.

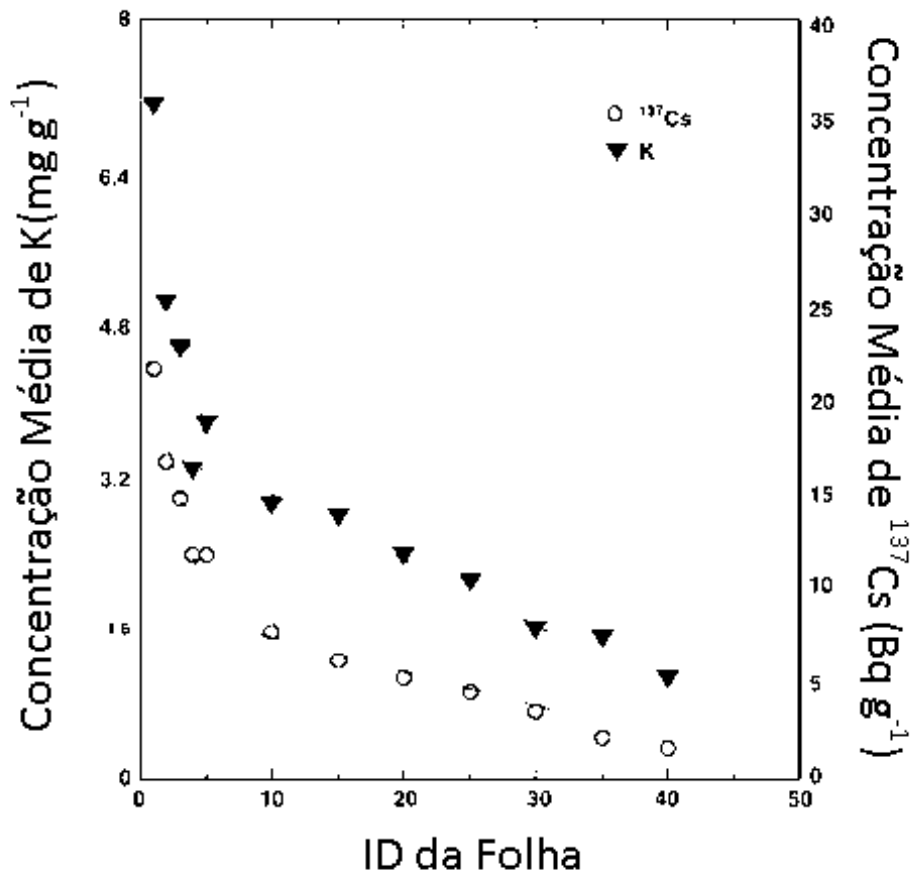


Figura 4. 6: Concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K em função do tamanho das folhas de coqueiros cultivados nas Ilhas Bikini (Robison et al., 2009).

A Figura 4.8 apresenta a evolução temporal das concentrações de K e Na durante o processo de crescimento dos cocos. Conforme mencionado anteriormente, nota-se que as concentrações de K e Na apresentam comportamentos semelhantes durante a maturação dos frutos. Assim, K e Na parecem ter padrões de comportamento realmente semelhantes nesta espécie de planta. Portanto, para cocos, é possível concluir que ^{137}Cs pode ser usado para rastrear o comportamento das concentrações de K e Na. Entretanto, o fato do Na apresentar comportamentos distintos em espécies diferentes evidencia que ^{137}Cs não é um traçador universal de

nutrientes inorgânicos monovalentes, isto é, não podemos usá-lo como traçador para qualquer espécie vegetal.

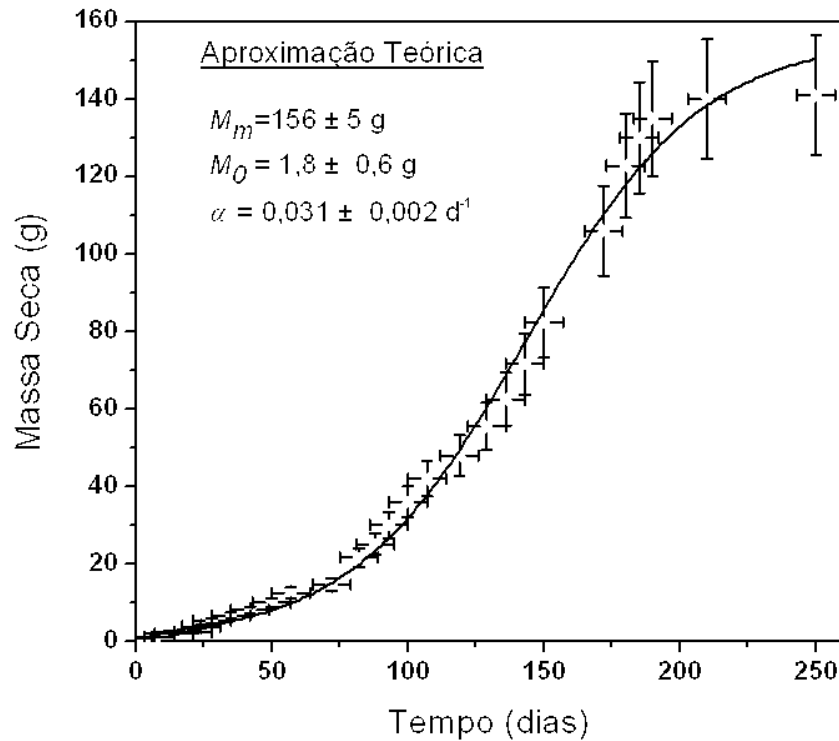


Figura 4. 7: Curva de crescimento para cocos. A curva verde representa um ajuste utilizando-se a Equação (3.1), com $R^2=0.99$. A Legenda apresenta os valores dos parâmetros ajustados.

Novamente foi realizado um ajuste para evolução temporal experimental das concentrações de cátions monovalentes inorgânicos presentes nos cocos (K e Na), através da Equação (3.4). O resultado é apresentado na Figura 4.9, onde o ajuste pode ser considerado muito satisfatório, uma vez que o parâmetro β , característico de uma função exponencial decrescente, possui o mesmo valor em ambos os casos ($\beta = 0,010 \pm 0,002 \text{ d}^{-1}$). Isto confirma que a planta apresenta mecanismos semelhantes para a incorporação de ambos os cátions em seus frutos. A Figura 4.10 fornece a quantidade de Na^+ e K^+ incorporada pelos frutos.

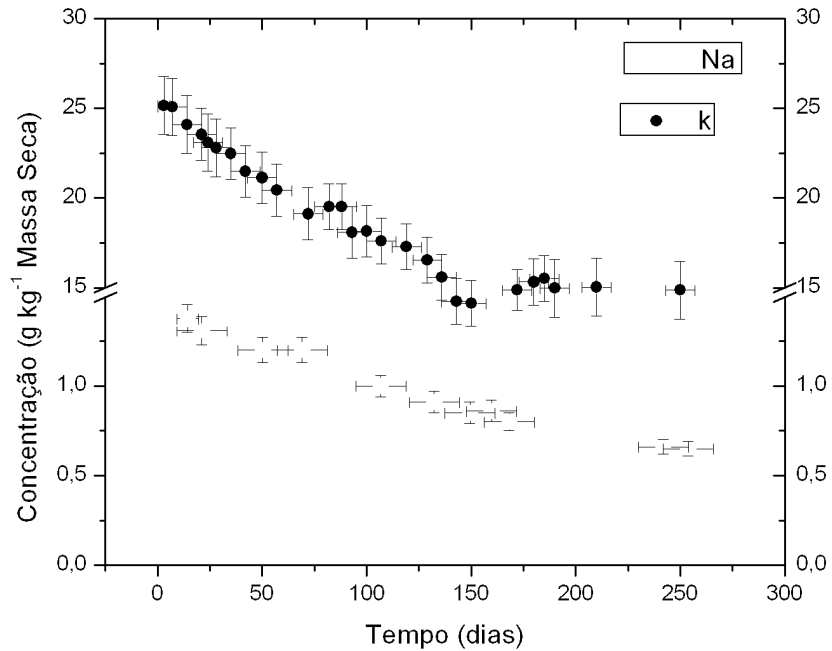


Figura 4. 8: Evolução temporal dos elementos sódio e potássio para cocos.

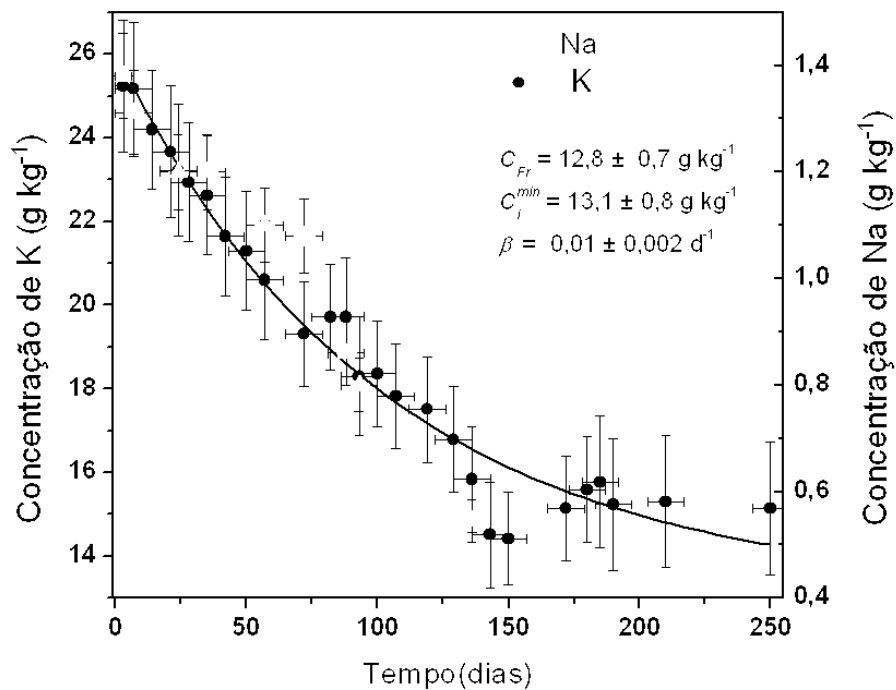


Figura 4. 9: Evolução temporal da incorporação de potássio e sódio em cocos. A curva verde representa o ajuste realizado por nosso Modelo (Equação 3.4) e a legenda representa os principais parâmetros obtidos a partir deste ajuste.

Estes resultados sugerem, portanto, a possibilidade de usar ^{137}Cs para prever o absorção e o transporte a longa distância de cátions inorgânicos monovalentes, uma vez que $^{137}\text{Cs}^+$ possui um comportamento semelhante ao K^+ em plantas cítricas e, como referendado por outros autores (Robison *et al.*, 2009), em espécies de palmeiras. Apesar de existir ainda incertezas sobre o status do sódio como um nutriente, a boa notícia deste trabalho é que o sódio exibe um comportamento semelhante ao de potássio (e assim, ao céσιο) em coqueiros. Tais observações sugerem que a concentração de ^{137}Cs em tecidos vegetais pode ser um marcador do estado nutricional de K em plantas tropicais. No que concerne ao Na, mais pesquisas são necessárias a fim confirmar a hipótese estudada neste trabalho.

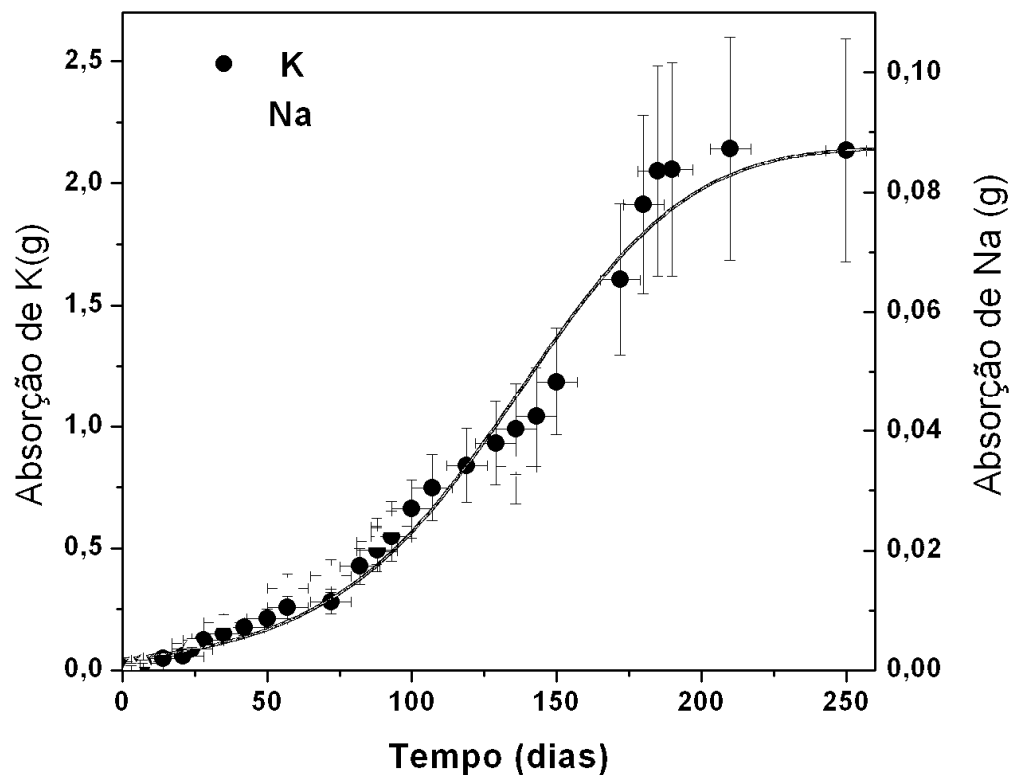


Figura 4. 10: Curva de absorção de potássio e sódio para cocos.

4.3. Fator de Transferência solo-fruto

Como já discutimos, o fator de transferência (F_v) é muito utilizado em radioecologia a fim de conhecer a taxa de absorção de radionuclídeos do solo para um compartimento da planta, em geral, um compartimento comestível. Contaminação das partes comestíveis de uma planta proveniente de um solo contaminado é o resultado da combinação de uma série de fatores, indo desde o mecanismo de absorção da raiz, do transporte pela raiz e da distribuição da raiz para a parte aérea da planta. Vários fatores podem afetar a transferência de radionuclídeos do solo para os frutos, tais como as características físico-químicas do solo (umidade do solo, pH, capacidade de troca catiônica - CEC, potencial de redução, a quantidade de matéria orgânica, atividade microbiana e aplicação de fertilizantes), intercepção da raiz com elementos químicos, absorção de íons pelas raízes, transporte de íons através das membranas da raiz, do seu transporte no sistema vascular do xilema e floema, etc. (Carini, 2001).

Vários estudos experimentais sobre a captação de elementos estáveis ou radioativos por plantas frutíferas têm sido realizados nas últimas décadas. Valores de fator de transferência solo-planta para ecossistemas temperados e tropicais constituídos para um amplo conjunto de espécies de plantas em diferentes tipos de solo já foram cadastrados em bases de dados desenvolvido pela *US Nuclear Regulatory Commission* (Ng et al., 1979), *the International Union of Radioecology (IUR)* (Frissel and van Bergeijk, 1989; Frissel et al., 2002) and the International Atomic Energy Agency (IAEA, 2010) com o objetivo de identificar as principais variáveis e processos que afetam o comportamento de radionuclídeos em plantas frutíferas. Apesar do fator de transferência solo-planta ser específico de um dado radionuclídeo, é importante notar que quando seus valores são calculados, o método pressupõe que a sua concentração em um dado compartimento de planta e no solo permanece constante ao longo do tempo. Isto significa que os fatores de transferência solo-fruto disponíveis na literatura são definidos numa situação de equilíbrio. Além disso, quando os modelos da cadeia alimentar para a descrição de processos chaves na transferência de radionuclídeos são aplicados, um estado de equilíbrio na concentração de radionuclídeos em cada compartimento é assumido (Ng et al., 1979). Durante o crescimento do fruto, este estado de equilíbrio é aceitável para a concentração de radionuclídeos no solo.

Contudo, ele pode ser uma grave limitação para uma análise precisa da quantidade do radionuclídeo presente no fruto. Desse modo, uma grande variabilidade nos valores de F_v tem sido observado em os radionuclídeos ou elementos estáveis estudados, mostrando variações de até 5 ordens de grandeza para diferentes combinações de solo e plantas. Para árvores lenhosas de clima temperado, por exemplo, para a faixa de valores de F_v em ^{137}Cs varia de $8,6 \times 10^{-4}$ a $8,0 \times 10^{-2}$ (Carini, 2009; IAEA, 2010). Em contraste, eles variam de $5,0 \times 10^{-2}$ a $8,7$ em climas tropicais e subtropicais (IAEA, 2010; Velasco *et al.*, 2009). Enquanto essa variabilidade tem sido reconhecida por diversos autores e atribuída aos vários fatores acima citados, diferentes hipóteses têm sido propostas, a fim de reduzir esta incerteza (Frissel *et al.*, 1989; Ehlken e Kirchner, 1996; Ehlken e Kirchner, 2002; Ciuffo *et al.*, 2002; Velasco *et al.*, 2004; Carini *et al.* 2005), uma vez que ela é certamente propagada para as estimativas do acúmulo de radionuclídeos nas etapas subsequentes da cadeia alimentar e, conseqüentemente, para o cálculo da exposição humana a radionuclídeos via cadeia alimentar (Carini, 2001, 2010; Shaw e Bell, 2001).

De acordo com estas observações, é interessante, então, avaliar o comportamento do fator de transferência em diferentes estágios de crescimento da planta ou em diferentes estágios de crescimento do fruto, uma vez que podem dar informações úteis sobre a variabilidade dos valores de F_v . Na situação do nosso estudo, todos os parâmetros relacionados às propriedades dos solos encontram-se fixos, uma vez que não se espera mudanças significativas nestes parâmetros durante o período de crescimento dos frutos. Os valores de F_v em função do tempo para o crescimento de limões são apresentados na Figura 4.11. As curvas foram obtidas usando as Equações (3.8) e (3.5). Os valores experimentais e teóricos indicam que $F_v(t)$ para ^{40}K e ^{137}Cs em limões depende do estágio de desenvolvimento. Além disso, o comportamento de $F_v(t)$ em ^{137}Cs é proporcional à ^{40}K , diminuindo com o aumento da idade dos frutos. Por outro lado, enquanto a variabilidade dos valores de F_v para ^{137}Cs em ambientes tropicais e subtropicais observados na literatura está em torno de 2 a 3 ordens de magnitude, a variabilidade de F_v calculada em nossa pesquisa é menor: duas, três vezes. Isto indica que, embora a variabilidade de F_v durante o crescimento-

maturação dos frutos é menor do que a variabilidade causada por propriedades do solo, este fato deve ser levado em consideração nos estudos radioecológicos.

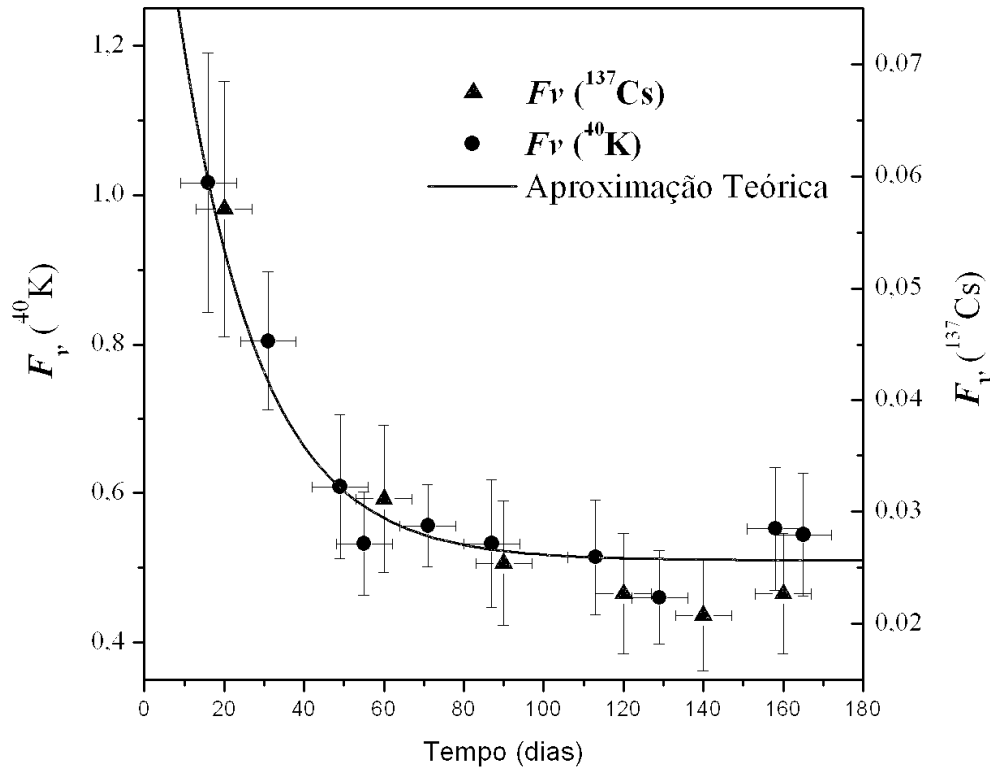


Figura 4.11: Fator de transferência para o potássio e o césio em limões. A curva representa um ajuste de nosso modelo utilizando as Equações (4.8) e (4.5).

De acordo com as recomendações da IUR (Frissel e van Bergeijk, 1989; Frissel et al., 2002), F_v deve ser medido quando o fruto está pronto para ser consumido. Apesar da Figura 4.11 mostrar claramente que perto da fase final de maturação dos limões a variação de F_v é mínima, nós acreditamos que o fato do fruto poder ser colhido e consumido em diferentes estágios de maturação deve ser considerado. Embora em radioecologia, considera-se que os frutos são colhidos e consumidos quando atingem a maturidade, isto não é estritamente verdadeiro. Muitos frutos são colhidos antes da maturação completa. Esta prática tem sido adotada uma vez que o mercado produtor tem que levar em conta o tempo necessário entre a coleta e consumo do fruto.

Durante este período há o tempo gasto entre o transporte, período de armazenamento e período em que os frutos são expostos para a venda. Assim, para que o consumidor tenha frutos frescos, eles são coletados cada vez mais cedo, mesmo que não atinja o período completo de sua maturação na planta. Além disso, há outros exemplos de frutos que são consumidos em diferentes estágios de desenvolvimento, como o pimentão vermelho e verde, pimentas verdes e vermelhas, tomates verdes e vermelhos, maçãs, azeitonas, frutas cítricas etc. Resultados obtidos pelo nosso grupo (LARA), por exemplo, têm mostrado que a concentração de ^{137}Cs em pimentas malaguetas verdes é significativamente maior que nas vermelhas (Carvalho *et al.*, 2006).

Além disso, a Figura 4.11 mostra que no início do período de desenvolvimento dos frutos, F_v é cerca de 17 vezes maior para ^{40}K que para ^{137}Cs . No período de maturação esta diferença parece aumentar, onde o fator de transferência solo-fruto para ^{40}K é cerca de 25 vezes superior ao do ^{137}Cs . Uma vez que $F_v(t)$ é um parâmetro adimensional, a comparação entre os valores de F_v para ^{137}Cs e ^{40}K não depende das unidades de concentração dos elementos envolvidos, indicando que embora as plantas absorvam e distribuam ^{137}Cs e ^{40}K (ou potássio total) pelos frutos da mesma forma, eles mostram uma maior afinidade para K que ^{137}Cs . Isto agora confirma o comportamento observado por Shaw e Bell (1989), onde os limoeiros possuem sim uma capacidade de discriminar K^+ e $^{137}\text{Cs}^+$, dando preferência ao primeiro íon. Esta constatação também esta de acordo com Zhu *et al.* (2002), segundo a qual acredita-se que o potássio, usado em solos em quantidades relativamente altas como fertilizante, seja eficaz em inibir a absorção de céσιο, devido à capacidade desses íons para bloquear a absorção de céσιο pelas raízes das plantas.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho foi avaliado o comportamento da evolução temporal da incorporação de dois nutrientes vegetais (K e Na) e de um radionuclídeo (^{137}Cs) em agroecossistemas tropicais, a fim compreender os mecanismos de acúmulo e transporte desses elementos ao longo do período de crescimento e maturação dos frutos de duas espécies distintas de plantas frutíferas tropicais: limoeiro (*Citruslimon B.*) e coqueiro (*Cocos nucifera L.*). Para tanto, foram utilizadas as técnicas de espectrometria da radiação gama e de ativação eletrônica para a determinação das concentrações de ^{137}Cs , K e Na. Também foi desenvolvido um modelo capaz de simular estes mecanismos.

Os resultados experimentais revelaram que os mecanismos de acúmulo e transporte de ^{137}Cs , K e Na apresentam uma considerável dependência da espécie da planta. Os três elementos apresentaram grande mobilidade, uma vez que suas concentrações apresentaram grandes variações durante o ciclo de crescimento dos frutos. Durante este ciclo, potássio sempre foi consumido em grandes quantidades por ambas as plantas. Sódio foi consumido em pequenas quantidades em cocos e em quantidades ainda menores nos limões. Césio sempre apresentou uma quantidade extremamente baixa, sendo considerado como um elemento traço no desenvolvimento dos frutos. K e ^{137}Cs mostraram comportamentos semelhantes na espécie cítrica, onde suas concentrações diminuíram exponencialmente com o crescimento dos frutos. Por outro lado, a concentração de Na apresentou um comportamento distinto, aumentando durante a maturação dos limões. Já para as palmeiras, o comportamento dos três elementos foi muito semelhante, onde suas concentrações diminuíam de forma exponencial com o crescimento dos frutos. Este

comportamento antagônico do Na confirma que seus efeitos benéficos sobre o crescimento dos frutos diferem consideravelmente entre espécies de plantas. As concentrações de Na necessárias para causarem um efeito benéfico durante o processo de amadurecimento dos limões, são baixas. Já o coqueiro pode ser considerado uma "espécie de médio a altos valores de Na", onde o efeito benéfico de Na é importante no crescimento da planta.

Em termos da comparação do comportamento de ^{137}Cs com os dois nutrientes vegetais, pode-se concluir que césio pode ser usado para rastrear a distribuição de potássio em plantas cítricas e de potássio e sódio em palmeiras. Baseado nestas evidências, nós construímos um modelo teórico com o objetivo de descrever o comportamento de nutrientes vegetais ao longo do período de desenvolvimento de frutos de plantas tropicais. O acordo obtido entre o modelo e os valores experimentais foi bem razoável. A disponibilidade de uma abordagem teórica para simular a entrada de ^{137}Cs nas partes comestíveis de plantas é importante, dado que a avaliação deste radionuclídeo permite tanto o desenvolvimento de técnicas de análise auxiliares nos estudos de fisiologia vegetal quanto na compreensão na evolução de ecossistemas florestais e agrícolas.

A título de observação é importante salientar que o uso do ^{137}Cs como rastreador não é um mero resultado acadêmico. O césio está disponível na natureza devido aos motivos já mencionados na introdução e por isso não é necessário contaminar plantas para utilizá-lo como traçador de potássio e/ou sódio. Uma situação prática que seria importante medir o césio para conhecer o comportamento de nutrientes vegetais é aquela que ocorre limitações experimentais para a medição do isótopo natural do potássio por exemplo. Como já dito anteriormente para realizar medidas confiáveis é necessário que o número de eventos detectados esteja acima do valor do limite inferior de detecção (LID) e pensando de forma prática é necessário uma quantidade menor de amostra contaminada para superar o LID. Isso é importante porque pode ser melhor medir frutos pequenos contaminados e depois fazer a correlação com o potássio.

Nossos resultados também confirmam o comportamento observado por Shaw e Bell (1989), onde embora Cs e K possuam comportamentos semelhantes no interior

das plantas, estas possuem uma capacidade de discriminar K^+ e $^{137}Cs^+$, dando preferência a primeiro íon. Esta constatação também está de acordo com Zhu *et al.* (2002), segundo a qual acredita-se que o potássio, usado em solos em quantidades relativamente altas como fertilizante, seja eficaz em inibir a absorção de céσιο, devido à capacidade que seus íons tenham para bloquear a absorção de céσιο pelas raízes das plantas.

Finalmente, este estudo indica que ainda há muito que se aprender sobre o comportamento de cátions monovalentes inorgânicos em plantas, sobre o efeito benéfico de alguns nutrientes vegetais e suas correlações com elementos não essenciais para as plantas, indicando que este é um campo de pesquisa vasto e que ainda pode render muitos frutos.

Referências

- 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, 201-204.
- 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, R.M., Mosquera, B., Sanches, N., Cambuí, C.A., Mercier, H., 2009a. Caesium, potassium and ammonium distributions in different organs of tropical plants. Environmental and Experimental Botany 65, 111-118.
- Anjos, R. M., Rizzotto, M., Sanches, N., Velasco, H., Valladares , D. L., Macario, K. D., 2009b. Accumulation of ^{137}Cs and ^{40}K in aboveground organs of tropical woody fruit plants. J Radioanal Nucl Chem 281, 7-10.
- Arnon, D.I., Stout, P.R., 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. Plant Physiol. 14, 371-375.
- Barci-Funel,G.,Dalmaso,J.,Barci,V.L.Ardisson,G.,1995.Study of transfer of radionuclides in trees at a Forest site. The Science of the Total Environment 173/174,369-373.
- Barker, A.V. and Pilbean, D. J., 2007.Handbook of plant nutrition. 2nd ed., Taylor & Francis Group. New York, USA.
- Camberra, 2003. Germanium Detectors. User's Manual.
- Carini F., Coughtrey P. J., Kinnersley R. P., 2001.Introduction.Journal of Environmental Radioactivity 52, 123-129.
- Carini, F., Atkinson, C. J., Collins, C., Coughtrey, P. J., Eged, K., Fulker, M., Green, N., Kinnersley, R., Linkov, I., Mitchell, N. G., Murlon, C., Ould-Dada, Z., Quinault, J. M., Robles, B., Stewart, A., Sweeck, L., Venter, A., 2005. Modelling and experimental studies on the transfer of radionuclides to fruit. Journal of Environmental Radioactivity 84, 271-284.
- Carini, F., 2009. Radionuclide transfer to fruit in the IAEA TRS 364 Revision. Journal of Environmental Radioactivity 100, 752-756.
- Carini, F., 2010. Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. IAEA Tech. Rep. Series N°. 472. International Atomic Energy Agency. Vienna.

- Carini, F., 2011. Radionuclide transfer from soil to fruit. *Journal of Environmental Radioactivity* 52, 237-279
- 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, L., Belli, M., Pasquale, A., Menegon, S., Velasco, H., 2002. ^{137}Cs and ^{40}K soil-to-Plant relationship of in natural grassland of the Giulia Alps, Italy. *The Science of the Total Environment* 295, 69-80.
- Cornejo Díaz, N., Jurado Vargas, M., 2008. DETEFF: An improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma-ray detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 586, 204–210.
- Delvaux B, Kruyts N, Maes E, Smolders E., 2000. Trace elements in the rhizosphere. In: Gobran GR, Wenzel WW, Lombin E, eds. *Fate of radiocesium in soil and rhizosphere*. Boca Raton, FL: CRC Press, 61–91.
- Ehlken, S., Kirchner, G., 1996. Seasonal variations in soil-to-plant transfer of fallout strontium and cesium and of potassium in north German soils. *Journal of Environmental Radioactivity* 33, 147-181.
- Ehlken, S., Kirchner, G., 2002. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. *Journal of Environmental Radioactivity* 58, 97-112.
- Epstein, E., 1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50: 641-664.
- Fogh, C.L., Anderson, K.G., 2001. Dynamic behavior of ^{137}Cs contamination in tree of the Briansk region. *The Science of the Total Environment* 269, 105-115.
- Frissel, M.J., van Bergeijk, K.E., 1989. Mean transfer values derived by simple statistical analysis. VIth Report of the Working Group Soil-to-Plant Transfer Factors, IUR, RIVM, Bilthoven, The Netherlands, pp. 10–12.
- Frissel, M.J., 1997. Protocol for the experimental determination of soil to plant transfer factors (concentration ratios) to be used in radiological assessment models. *IIR Newsletter* 28.
- Frissel, M.J., Deb, D.L., Fathony, M., Lin, Y.M., Mollah, A.S., Ngo, N.T., Othman, I., Robison, W.L., Skarlou-Alexiou, V., Topcuolu, S., Twining, J.R., Uchida, S., Wasserman, M.S., 2002. Generic values for soil-to-plant transfer factors of radiocesium. *J. of Environ Radioactivity* 58, 113-128.

- Frissel, M.J., van Bergeijk, K.E., 1989. Mean transfer values derived by simple statistical analysis. VIth Report of the Working Group Soil-to-Plant Transfer Factors, IUR, RIVM, Bilthoven, The Netherland, pp.10-12.
- Heath, R.L., 1964. Scintillation Spectrometry. Gamma-ray spectrum catalogue. Gamma-ray spectrometry center – Idaho National Engineering & Environmental Laboratory. 2^a Edition. EUA.
- Husted et al., 2000 S. Husted, C.A. Hebborn, M. Mattsson and J.K. Schjoerring, experimental evaluation of methods for determination of NH₄⁺ in plant tissue xylem sap and apoplastic fluid. *Physiol. Plant.*, 109 (2000), pp. 167–179.
- IAEA, 1988. The Radiological Accident in Goiânia. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 1998. International Atomic Energy Agency. Use of ¹³⁷Cs in the study of soil erosion and sedimentation. IAEA TECDOC-1028. Vienna: IAEA Publications.
- IAEA, 2005. Worldwide Marine Radioactivity Studies (WOMARS) Radionuclide levels in Oceans and Seas, 2005. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2010. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports Series N° 472. Date of Issue: 23 March 2010.
- IUR, 1992. International Union of Radioecology. Protocol developed by the Working Group on Soil to Plant Transfer, 1982-1992, IUR, Saint-Paul-lez-Durance, France.
- Knoll, G. F., 1979. Radiation Detection & Measurement. New York: John Wiley & Sons, 1979. 816p.
- Lederer, C.M., Shirley, V.S., 1978. Table of Isotopes, 7th Edition. New York: John Wiley and Sons.
- Mc Gee, E.J., Synnott, H.J., Johanson, K.J., Fawaris, B.H., Nelsen, S.P., Horril, A.D., Kennedy, V.H., Barbayiannis, N., Veresoglov, 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.
- McGee, Harold, 2011. Comida & Cozinha ciência e cultura da culinária. Martins Fontes.
- Mengel, K., 2007. Handbook of Plant Nutrition: Chapter 4: Potassium. Ed. Barker, A. V. & Pilbean, D. J. Ed. ISBN. 9780824759049.
- Mosquera, B., Veiga, R., Mangia, L., Carvalho, C., Estellita, L., Uzeda, D., Facure, A., Violini, B., Anjos, R.M., 2004. ¹³⁷Cs Distribution in Guava trees. *Brazilian Journal of Physics* 34-3A, 841-844.

- Mosquera, B., Carvalho, C., Veiga, R., Mangia, L., Anjos, R.M., 2006. ^{137}Cs distribution in tropical fruit trees after soil contamination. *Environmental and Experimental Botany* 55, 273-281.
- Morton, J., 1987. *Fruits of Warm Climates*. Julia F. Morton, Miami, FL, USA.
- Ng, Y.C., Colsher, C.S., Thompson, S.E., 1979. Transfer factor for assessing the dose from radio- nuclides in agricultural products. In: *Biological Implications in Radionuclides Released from Nuclear Industries*, V. 2. IAEA, Vienna, pp. 295–318.
- Okuno, Emico & Yoshimura, Elisabeth, 2010. *Física das Radiações*. Ed. Oficina de Textos.
- Pallardy, S. G., 2008. *Physiology of woody plants*. 5th Ed., Elsevier Inc., Massachusetts, USA.
- Ribas, R. V., 2002. *Instrumentação Nuclear: capítulo1: Detectores de Radiação*. USP.
- Robison, W. L., Brown, P. H., Stone, E. L., Hamilton, T. F., Conrado, C. L. and Kehl, S. 2009. Distribution and ratios of ^{137}Cs and K in control and K-treated coconut trees at Bikini Island where nuclear test fallout occurred: effects and implications. *J. Environ.Radioact.* 100, 76-83.
- Sanches, N., Anjos, R.M., Mosquera, B., 2008. $^{40}\text{K}/^{137}\text{Cs}$ discrimination ratios to the aboveground organs of tropical plants. *J. Environ.Radioact.* 99, 1127-1135.
- Shaw, G., Bell, J.N.B., 2001. Transfers in agricultural semi-natural environments. In: Van der Stricht, E., Kirchmann, R. (Eds.), *Radioecology. Radioactivity & Ecosystems*. Fortemps, Belgium, pp. 112–135.
- Siebrecht and Tischner, 1999 S. Siebrecht and R. Tischner, Changes in the exudate composition of poplar *Populus tremula* × *P. alba*-dependent on nitrogen. *J. Exp. Bot.*, 50 (1999), pp. 1797–1806.
- Taiz, L., Zeiger, E., 2004. *Plant Physiology*, 3rd ed., Sinauer Associates Inc., Massachusetts, USA.
- Varenes, A., 2003. *Produtividade dos Solos e Ambiente*, Escolar Editora, 1º Ed., ISBN - 972-592-156-9, Lisboa, Portugal.
- Veiga, R., Sanches, N., Anjos, R.M., Macario, K., Bastos, J., Iguatemy, M., Aguiar, J.G., Santos, A.M.A., Mosquera, B., Carvalho, C., Baptista Filho, M., Umisedo, N.K., 2006. Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands. *Radiation Measurements* 41, 189-196.
- Velasco, H., Juri Ayub, J., Belli, M., Sansone, U., 2004. Temporal variation of the ^{137}Cs and ^{40}K flux from soil to grass in semi-natural ecosystems. *J. of Environ. Radioactivity* 71, 225-241.

- Velasco, H., Juri Ayub, J., Sansone, U., 2009. Influence of crop types and soil properties on radionuclide soil-to-plant transfer factors in tropical and subtropical environments. *Journal of Environmental Radioactivity* 100 (9), 733-738.
- White, P.J., Broadley, M.R., 2000. Mechanisms of caesium uptake by plants. *New Phytologist* 147, 241–256.
- Zamboni, Cibele Bugno, 2007. Fundamentos da Física de Nêutrons. Capítulo 6: Ativação Neutronica. Ed. Livraria da Física.
- Zhu, Y.G., Smolders, E., 2000. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *Journal of Experimental Botany* 51, 1635–1645.