

**COEFICIENTES DE TRANSLOCAÇÃO FOLHA-FRUTO
DE ^{60}Co , ^{90}Sr e ^{137}Cs EM FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris*)**

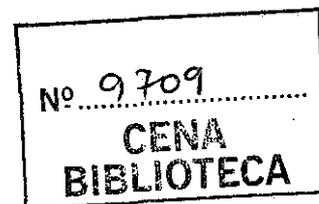
JOSÉ FLÁVIO MACACINI

Físico

Orientadora: **Prof^ª Dr^ª ELISABETE A. DE NADAI FERNANDES**

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Janeiro - 2000



**Dedico este trabalho
a um homem
que se fez
mestre
na arte
de viver:
Guilherme Marcacini**

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA

À Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN

Ao Laboratório de Poços de Caldas – CNEN/COLAB

À Prof^ª. Dr^ª. Elisabete A. De Nadai Fernandes pela orientação, apoio e confiança durante a realização dos cursos e na elaboração deste trabalho.

Ao químico Wilson Cervi da Costa, coordenador do Laboratório de Poços de Caldas – COLAB, por me conceder a oportunidade e incentivar a realizar o curso de mestrado.

À química Maria Helena Tirollo Taddei e ao MSc. Moacir Cipriani pelo incentivo para realizar o curso de mestrado.

Aos amigos Henrique Takuji Fukuma e Claudio Celestino de Oliveira pelo incentivo.

Ao amigo Nivaldo Carlos da Silva pelo incentivo, colaboração e discussões.

Aos técnicos do Laboratório de Poços de Caldas, Armando Bruschi, Claudio Vitor Roque, Eder Tadeu Zenun Gerrero, Julio Cesar Ferrari, Luiz Henrique de Macedo, Manoel Rita Ribeiro, Marcelo Tarquínio, Marco Antônio da Silva e Rubens São Julião, pela colaboração nas aspersões e análises.

Aos amigos Cláudio, Fábio, Márcio, Adriana, Paulo e Helder do Laboratório de Radioisótopos do CENA e a todos que diretamente ou indiretamente colaboraram ou incentivaram para que este trabalho fosse concluído.

Aos amigos Francisco Gonçalves (Chico), Wladimir Seixas e Luis Antonio da Silva Vasconcelos pelo incentivo.

Aos meus pais pelo incentivo.

À minha esposa Luciene, às minhas filhas Ana Carolina e Gabriela, e ao meu filho João Victor, pelo amor, incentivo e compreensão de cada um.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	ix
SUMMARY.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 Solo e plantio.....	11
3.2 Aspersões.....	12
3.2.1 Equipamentos utilizados nas aspersões.....	12
3.2.2 Procedimento para as aspersões.....	13
3.2.3 Material radioativo aspergido.....	15
3.3 Planejamento estatístico.....	16
3.4 Análise estatística.....	24
3.5 Métodos de análise.....	25
3.5.1 Preparação das amostras e padrões.....	25
3.5.2 Espectrometria gama de alta resolução.....	26
3.5.3 Determinação radioquímica do ⁹⁰ Sr.....	26
3.6 Translocação e coeficiente de translocação.....	28
3.7 Proteção radiológica.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Desenvolvimento da cultura e colheita.....	30
4.2 Deposição e retenção dos radionuclídeos.....	35
4.3 Proteção radiológica.....	35
4.4 Resultados das determinações.....	36

4.5	Reavaliação do planejamento estatístico.....	41
4.6	Análise estatística.....	42
4.7	Análise da regressão.....	46
4.8	Discussões.....	50
5	CONCLUSÕES.....	53
Anexo A	Programa estatístico elaborado para o SAS para análise de variância e testes F dimensionado para 4 tratamentos e 4 blocos.....	54
Anexo B	Distribuição dos blocos e vasos na casa de vegetação.....	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Campânula e equipamentos de proteção individual.....	14
2	Feijoeiros, 30 dias após plantio.....	30
3	Feijoeiros, 45 dias após plantio.....	31
4	Folhas de feijoeiro e gema apical com mosaico comum.....	32
5	Folhas de feijoeiro com mosaico dourado.....	33
6	Curva e equação de translocação $Tr_1(t)$ de ^{60}Co em feijoeiro.....	47
7	Curva e equação de translocação $Tr_1(t)$ de ^{137}Cs em feijoeiro.....	47
8	Curva e equação de translocação $Tr_2(t)$ de ^{60}Co em feijoeiro.....	48
9	Curva e equação de translocação $Tr_2(t)$ de ^{137}Cs em feijoeiro.....	48
10	Curva e equação de translocação $Tr_3(t)$ de ^{60}Co em feijoeiro.....	59
11	Curva e equação de translocação $Tr_3(t)$ de ^{137}Cs em feijoeiro.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Características físico-químicas dos radionuclídeos aspergidos.....	16
2	Distribuição dos coeficientes de translocação para tratamento estatístico.....	17
3	Análise de variância com aplicação de teste F para tratamentos....	19
4	Análise de variância com aplicação de teste F para regressão polinomial.....	21
5	Atividade aspergida e retida por vaso (dois feijoeiros)	35
6	Resultados das medidas de massa úmida e seca e área foliar.....	37
7	Atividade específica do ^{60}Co nas folhas e frutos e coeficientes de translocação.....	38
8	Atividade específica do ^{137}Cs nas folhas e frutos e coeficientes de translocação.....	39
9	Atividade específica do ^{90}Sr nas folhas e frutos e coeficientes de translocação (*LD = 0,048 cps)	40
10	Análise de variância com teste F para translocação (definição 1) e regressão polinomial com teste F para ^{60}Co	43
11	Análise de variância com teste F para translocação (definição 1) e regressão polinomial com teste F para ^{137}Cs	43
12	Análise de variância com teste F para translocação (definição 2) e regressão polinomial com teste F para ^{60}Co	44
13	Análise de variância com teste F para translocação (definição 2) e regressão polinomial com teste F para ^{137}Cs	44
14	Análise de variância com teste F para translocação (definição 3) e regressão polinomial com teste F para ^{60}Co	45
15	Análise de variância com teste F para translocação (definição 3) e regressão polinomial com teste F para ^{137}Cs	45
16	Máximos de translocação de ^{60}Co e ^{137}Cs em feijoeiro.....	51

COEFICIENTES DE TRANSLOCAÇÃO FOLHA-FRUTO DE ^{60}Co , ^{90}Sr e ^{137}Cs EM FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris*)

Autor: José Flávio Macacini

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Elisabete A. De Nadai Fernandes

RESUMO

A utilização crescente da fissão nuclear para geração de energia elétrica faz com que os aspectos relativos à segurança de usinas eletronucleares sejam avaliados criteriosamente. Na eventualidade de um acidente com liberação de material radioativo para a atmosfera, é imprescindível dispor de conhecimentos do comportamento de espécies vegetais, quando em contato com radionuclídeos. Um caminho importante de contaminação de produtos agrícolas com radionuclídeos é a translocação folha-fruto, quantificada através de coeficientes de translocação. Esta grandeza pode ser avaliada em um ambiente controlado utilizando-se de radionuclídeos artificiais como traçadores para simular uma contaminação por *fallout*. Com o objetivo de quantificar os coeficientes de translocação folha-fruto de ^{60}Co , ^{90}Sr e ^{137}Cs em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), variedade diamante negro, foi montado um experimento em casa de vegetação com delineamento experimental em blocos completos casualizados com seis tratamentos e quatro blocos. Uma mistura destes três radionuclídeos foi preparada e utilizada para estimar os referidos coeficientes. Os feijoeiros foram aspergidos em uma campânula, utilizada para evitar contaminação ocupacional e ambiental. Em cada tratamento foram aspergidos quatro vasos no interior de uma campânula. Destes, um foi tomado para estimativa da atividade inicial nas folhas dos

feijoeiros dos três vasos restantes. Foi utilizada espectrometria gama para determinação de ^{60}Co e ^{137}Cs e separação química seguida de detecção beta de ^{90}Y para determinação de ^{90}Sr . O experimento teve o número de tratamentos reduzido de seis para quatro, sendo efetivadas as aspersões correspondentes a 30, 45, 60 e 75 dias após o plantio. Tal fato foi atribuído ao ataque de pragas como mosaico comum e dourado. As características apresentadas pelos feijoeiros, decorrentes destas doenças, foram observadas a partir de 50 dias após o plantio. Foi possível, entretanto, verificar uma dependência funcional entre instante de aspersão do traçador e estágio de desenvolvimento fisiológico do feijoeiro. Verificou-se que as relações funcionais entre coeficientes de translocação e tempo para ^{60}Co e ^{137}Cs foram semelhantes. As relações funcionais $\text{Tr}_n(t)$ obtidas para os radionuclídeos foram:

$$^{60}\text{Co}: \quad \text{Tr}_1(t) = 0,005196 t^3 - 0,9834 t^2 + 57,39 t - 957,3 \quad \text{mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$$

$$^{137}\text{Cs}: \quad \text{Tr}_1(t) = 0,00451 t^3 - 0,870 t^2 + 51,74 t - 874,48 \quad \text{mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$$

$$^{60}\text{Co}: \quad \text{Tr}_2(t) = -0,000181 t^2 + 0,0171 t - 0,248 \quad \text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$$

$$^{137}\text{Cs}: \quad \text{Tr}_2(t) = -0,000171 t^2 + 0,0171 t - 0,270 \quad \text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$$

$$^{60}\text{Co}: \quad \text{Tr}_3(t) = -0,00539 t^2 + 0,5576 t - 11,29 \quad \text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$$

$$^{137}\text{Cs}: \quad \text{Tr}_3(t) = -0,00532 t^2 + 0,5587 t - 11,50 \quad \text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$$

Para o ^{90}Sr , a translocação ficou abaixo de $2,5 \text{ mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$, $0,005 \text{ Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$ e $0,04 \text{ Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$, confirmando a característica deste radionuclídeo de muito baixa mobilidade no interior de vegetais.

**COEFFICIENTS OF LEAF-FRUIT TRANSLOCATION FOR
 ^{60}Co , ^{90}Sr AND ^{137}Cs IN BEAN PLANT (*Phaseolus vulgaris*)**

Author: José Flávio Macacini

Adviser: Prof^a. Dr^a. Elisabete A. De Nadai Fernandes

SUMMARY

Due to the increasing use of nuclear fission for the generation of electrical energy, the safety aspects of power plants must be minutely appraised. In case of an accident, with liberation of radioactive material into the atmosphere, knowledge about the behavior of plant species when in contact with radionuclides is indispensable. An important route through which agricultural products are contaminated by radionuclides is leaf-fruit translocation. This phenomenon can be evaluated by simulating a fallout contamination in a controlled atmosphere using as a tracer man-made radionuclides. In order to quantify the leaf-fruit translocation coefficients for ^{60}Co , ^{90}Sr and ^{137}Cs in the common bean (*Phaseolus vulgaris*), variety black diamond, an experiment was carried out in a greenhouse with completely randomized blocks design with six treatments and four blocks. A mixture of these three radionuclides was prepared and used to determine their translocation coefficients. The bean plants were contaminated inside a device especially designed to avoid environmental contamination. In each treatment four vases were sprinkled and one was used to estimate the initial activity of the other three vases. High-resolution gamma-ray spectrometry was used for ^{60}Co and ^{137}Cs activity determinations and chemical separation followed by beta counting of ^{90}Y

was used for ^{90}Sr determinations. The number of treatments was reduced from six to four sprayings corresponding to 30, 45, 60 and 75 days after planting. This reduction was due to the attack of common and gold mosaic viruses. Symptoms were observed on the diseased bean plants 50 days after planting. It was possible, however, to verify a functional dependence between instant of tracer application and the level of physiological development of the bean plant. It was verified that the temporal relationship values for leaf-fruit translocation were similar for ^{60}Co and ^{137}Cs . The functional relationships $\text{Tr}_n(t)$ obtained, as well as radionuclides and units are:

^{60}Co	$\text{Tr}_1(t) = 0,005196 t^3 - 0,9834 t^2 + 57,39 t - 957,3$	$\text{mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$
^{137}Cs	$\text{Tr}_1(t) \cong 0,00451 t^3 - 0,870 t^2 + 51,74 t - 874,48$	$\text{mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$
^{60}Co	$\text{Tr}_2(t) = -0.000181 t^2 + 0.0171 t - 0.248$	$\text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$
^{137}Cs	$\text{Tr}_2(t) = -0.000171 t^2 + 0.0171 t - 0.270$	$\text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$
^{60}Co	$\text{Tr}_3(t) = -0.00539 t^2 + 0.5576 t - 11.29$	$\text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$
^{137}Cs	$\text{Tr}_3(t) = -0.00532 t^2 + 0.5587 t - 11.50$	$\text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$

For the ^{90}Sr , the translocation was below $2,5 \text{ mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$, $0,005 \text{ Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$ and $0,04 \text{ Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$, confirming that this radionuclide has a very low mobility inside the plant.

1. INTRODUÇÃO

Na hipótese de *fallout* após um acidente nuclear, ocorrerá contaminação da área rural e urbana circundante, vinculada às condições meteorológicas locais. Alguns aspectos regionais deverão ser avaliados para que sejam efetivas as medidas de descontaminação do ambiente e atenuação de doses. Uma resposta rápida e confiável deve ser implementada de modo a evitar especulações da mídia e o aumento da magnitude do problema por parte do público. Para tanto, torna-se imprescindível o conhecimento prévio do comportamento de espécies vegetais, quanto aos caminhos seguidos por radionuclídeos na cadeia alimentar da dieta humana.

Dependendo das dimensões da região atingida é impraticável a coleta de amostras para avaliar a contaminação em cada unidade de área considerada. Portanto, devem ser criados mecanismos que propiciem estimativas fidedignas da atividade dos radionuclídeos contaminantes. Neste intuito, poder-se-ão utilizar modelos matemáticos para estimativa de doses, propiciando agilidade e atenuação dos efeitos da exposição do homem à radiação.

Alimentos contaminados radioativamente durante seu cultivo ou cultivados em solos contaminados passarão a ter um adicional de radiação ionizante além do nível natural. Este acréscimo pode inviabilizar o cultivo e a disponibilidade comercial destes alimentos para consumo humano.

Dois caminhos principais podem fazer com que radionuclídeos artificiais atinjam a parte comestível de uma espécie vegetal: a translocação por meio da contaminação foliar e a transferência pelas raízes. Estas duas formas de contaminação dependerão da espécie vegetal, do radionuclídeo contaminante, de sua concentração e da idade ou estágio de desenvolvimento fisiológico do cultivar durante a contaminação e colheita.

No caso de deposição radioativa em vegetais faz-se necessário o conhecimento dos coeficientes de translocação folha-fruto, definidos por Müller & Pröhl (1993) como a fração de atividade que após deposição na parte aérea consegue migrar para o fruto ou parte comestível do vegetal até o momento da colheita. O PARATI - Program for the Assessment of Radiological Consequences in a Town and of Intervention after a Radioactive Contamination - (Rochedo et al., 1996) é um modelo matemático para estimativa de doses com os mesmos objetivos do modelo alemão ECOSYS-87 (Müller & Pröhl, 1993), porém direcionado para ambientes urbanos brasileiros. Embora estes modelos se complementem, apresentam barreiras que os impedem de atuar simultaneamente em uma região de interesse, tanto no Brasil como na Alemanha. O PARATI foi montado a partir de dados relativos aos tipos de edificações, pisos, árvores e climas característicos das cidades brasileiras, o que obviamente não é válido para o ambiente urbano alemão. O ECOSYS-87, por sua vez, foi elaborado para atuar em ambientes rurais de acordo com as peculiaridades climáticas e agropecuárias do território alemão, inviabilizando sua aplicação direta em território brasileiro.

Um projeto em andamento, denominado Concentração de Radionuclídeos em Alimentos (CORAL), idealizado pelo IRD (Instituto de Radioproteção e Dosimetria), Rio de Janeiro - RJ, financiado com recursos da IAEA (International Atomic Energy Agency), Viena, pretende estabelecer um modelo para estimativa de doses decorrentes de radiações ionizantes, segundo os moldes do ECOSYS-87, direcionado para ambientes rurais brasileiros. Desta

forma, o CORAL necessitará de dados relativos às atividades agrícolas, variedades mais cultivadas, épocas de plantio, além de constantes que estimem quantitativamente a atividade de contaminantes radioativos que, após deposição, migram para a parte comestível de vegetais.

A literatura é escassa de dados sobre translocação correlacionada com o estágio de desenvolvimento fisiológico para espécies vegetais caracteristicamente produzidas nas condições geográficas do hemisfério sul.

Embora as condições de segurança de uma usina eletronuclear sejam otimizadas e constantemente reavaliadas, a ocorrência de um acidente pode causar alterações tão graves no meio ambiente que se tornaria inóspito para o ser humano. Esta é uma projeção fatalista, entretanto é levada em conta quando uma usina eletronuclear é projetada (SBF, 1977).

As usinas eletronucleares de Angra I, com início de funcionamento em outubro de 1981 e operação comercial em 1982 (Leite, 1997), e Angra II (em fase de licenciamento para operação inicial) situam-se na praia de Itaorna, município de Angra dos Reis - RJ, distante 130 km da cidade de Rio de Janeiro, 220 km de São Paulo e 350 km de Belo Horizonte (Santina, 1978).

O hábito alimentar do brasileiro é bem peculiar e, apesar das dimensões continentais do Brasil, o par arroz e feijão é o constituinte básico das refeições principais em todo o país. Dentre os principais produtores de feijão destacam-se os estados de São Paulo e Minas Gerais.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo determinar os coeficientes de translocação de ^{60}Co , ^{90}Sr e ^{137}Cs em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), variedade diamante negro, em função do estágio de desenvolvimento da cultura. Estes radionuclídeos foram escolhidos por serem produtos de fissão e facilmente assimilados pelo organismo humano através da ingestão de alimentos contaminados e por migrarem para partes extensas do corpo - ^{60}Co para o sangue, ^{90}Sr para os ossos e ^{137}Cs para o tecido muscular (Nielsen, 1981). O percentual de

^{60}Co resultante da fissão nuclear é baixo em usinas eletronucleares com projetos similares ao de Angra 2. A ativação por nêutrons faz com que este radionuclídeo apareça na água do reator primário e em elementos de filtros de ar situados na área controlada (Eletronuclear, 1998).

Assim, pode-se justificar este trabalho pela carência de dados para estimativa de translocação folha-fruto de radionuclídeos em espécies vegetais importantes para a economia brasileira.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Oestling et al. (1989) aplicaram em folhas de feijoeiro, após a formação das partes comestíveis, de 0,10 a 2,00 mL de uma mistura contendo $1,0 \pm 0,5 \cdot 10^5 \text{ Bq mL}^{-1}$ de ^{134}Cs e ^{85}Sr . A translocação folha-fruto de ^{85}Sr foi muito menor que a de ^{134}Cs , fato este atribuído à pequena aderência do ^{85}Sr às folhas e à baixa velocidade de deslocamento deste radionuclídeo no interior das plantas, já observadas por outros pesquisadores. Os coeficientes de translocação de ^{85}Sr foram menores que 2% e os de ^{134}Cs variaram de 16% a 32 %, determinados a partir da atividade total no fruto pela atividade total depositada.

Pröhl et al. (1991) aspergiram ^{137}Cs diluído em água de enxurrada, coletada após o *fallout* de Chernobyl, em trigo de inverno e primavera, cevada de inverno, centeio e feijão vagem. Os coeficientes de translocação do ^{137}Cs variaram por um fator de 100 dependendo do estágio de desenvolvimento fisiológico da planta no momento da deposição. A atividade no fruto devido à translocação de ^{137}Cs foi cerca de 1000 vezes maior que a transferência pelas raízes. Os coeficientes de transferência comparados com os de translocação encontrados para cereais e batata atingiram valores de até 10^5 . Para o feijão vagem, os coeficientes de translocação máximos ($0,29 \text{ Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$ e $0,13 \text{ Bq m}^{-2}/\text{Bq kg}^{-1}$) ocorreram por volta de 42 dias após o plantio.

Voigt et al. (1991), comparando vários experimentos relacionados com a translocação de ^{137}Cs , verificaram discrepâncias entre os coeficientes determinados para um mesmo vegetal e radionuclídeo, atribuindo às diferenças

existentes entre condições experimentais de umidade, temperatura, variedade utilizada, nutrientes disponíveis no solo e época de plantio. Contudo, os valores dos coeficientes não variaram mais do que 25 %, sendo uma boa aproximação para erros inerentes a tais experimentos. Para cereais e batatas, foi demonstrada a dependência temporal da translocação segundo uma função gaussiana, de acordo com o desenvolvimento fisiológico destes vegetais.

Aarkrog (1983), contaminando cevada com spray contendo ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{125}Sb e ^{137}Cs diluídos em água, discutiu seus resultados com respeito à modelagem matemática segundo a função

$$\mu(t) = Ae^{-k(t-b)}$$

onde $\mu(t)$ é a atividade (Bq kg^{-1}) no cereal após colheita; t (dias), o tempo transcorrido entre aspersão e colheita; A (Bq kg^{-1}), o máximo valor de translocação; b (dias), o momento em que A ocorre; k , uma constante denominada fator efetivo de translocação que permite o ajuste da curva de acordo com o tempo requerido para cultivo da espécie vegetal considerada. Esta relação foi empregada para determinar a atividade específica normalizada (NSA), definida para uma taxa de deposição contínua e uniforme sobre o vegetal, durante todo seu período vegetativo, matematicamente expressa por

$$\text{NSA} = \int_0^t \mu(t) dt \quad (\text{m}^2\text{kg}^{-1}\text{dia})$$

As atividades específicas normalizadas foram determinadas, cabendo o menor valor ao ^{90}Sr ($1,4 \text{ Bq kg}^{-1} / \text{Bq d}^{-1} \text{ m}^{-2}$) comparativamente a ^{137}Cs ($4,6 \text{ Bq kg}^{-1} / \text{Bq d}^{-1} \text{ m}^{-2}$) e ^{60}Co ($5,9 \text{ Bq kg}^{-1} / \text{Bq d}^{-1} \text{ m}^{-2}$).

Carini et al. (1994) verificaram que a aplicação de desfolhantes não letais em parreiras aspergidas com ^{134}Cs , logo após a deposição, diminuiu em 4 vezes os coeficientes de translocação para uva e em 5 para o vinho. No ano seguinte à aplicação do desfolhante, os coeficientes de translocação para uva e vinho foram 17 e 70 vezes menores que os valores encontrados para a uva e vinho das parreiras não desfolhadas.

Carini et al. (1996) estudaram a translocação de ^{134}Cs em parreiras, quantificando a translocação para uva ($0,21 \text{ Bq kg}^{-1} / \text{Bq planta}^{-1}$), suco de uva ($0,20 \text{ Bq kg}^{-1} / \text{Bq planta}^{-1}$) e vinho ($0,12 \text{ Bq kg}^{-1} / \text{Bq planta}^{-1}$).

A partir da década de 70 foram apresentados alguns modelos radioecológicos dinâmicos (Booth et al., 1971; Pleasant et al., 1980; Linsley et al., 1982; Matthies et al., 1982; Koch & Tadmor, 1986; Whicker & Kirchner, 1987, citados por Müller & Pröhl, 1993) para avaliação das conseqüências de lançamentos acidentais de radionuclídeos, com ênfase em ambientes rurais, enfocando caminhos da cadeia alimentar. Alguns destes modelos foram usados para estimar os efeitos radiológicos do acidente de Chernobyl, logo após sua ocorrência em abril de 1986.

Nos diferentes países envolvidos no acidente, estudos ambientais subseqüentes permitiram a criação de bancos de dados relativos às contaminações urbana e rural, tornando-se a principal fonte para validação de modelos matemáticos (Ozluoglu, 1991).

A maioria dos modelos não respondeu satisfatoriamente quando submetidos aos dados coletados a partir do acidente de Chernobyl. A maior parte deles não levou em consideração os vários tipos de gêneros alimentícios, atribuindo menor importância à estimativa de dose para o homem comum, principal componente da população. Outros modelos não consideraram a dose decorrente para grupos críticos que fazem uso de dietas especiais como por exemplo, lactentes e vegetarianos. Uma falha comum foi não correlacionar o

estágio de desenvolvimento das várias espécies de plantas com o instante de contaminação (Müller & Pröhl, 1993). As várias falhas levaram à separação entre modelos aplicáveis a regiões rurais daqueles destinados a regiões urbanas.

O grande banco de dados formado a partir do acidente de Chernobyl permitiu a Müller & Pröhl (1993) a validação de um modelo para ambientes rurais da Alemanha, denominado ECOSYS-87.

Transcorrido um mês do acidente de Chernobyl, Paasikallio et al. (1993) iniciaram em 14 locais distintos na Finlândia, todos contaminados pelo *fallout*, uma série de experimentos para avaliar os coeficientes de transferência solo-planta de ^{137}Cs e ^{90}Sr para alface, repolho, cenoura, batata, cebola, morango e maçã. Estes coeficientes foram estimados e correlacionados com vários tipos de solos, durante os quatro anos seguintes ao acidente. A atividade nas amostras de solo, coletadas em camadas de 0,2 m de profundidade a partir da superfície, variou de 2,0 a 44 kBq m⁻² para ^{137}Cs e de 0,42 a 1,22 kBq m⁻² para ^{90}Sr .

Durante os dois primeiros anos após o acidente de Chernobyl, Monte et al. (1990) estudaram a translocação de ^{137}Cs e concluíram que árvores frutíferas (nogueira, castanheira, aveleira, oliveira e macieira) têm como principal via de contaminação a deposição foliar. No entanto, a meia-vida biológica deste tipo de contaminação é inferior a 265 dias. A atividade de ^{137}Cs logo após a deposição atingiu até 11 kBq m⁻². A atividade específica encontrada no perfil do solo foi 35, 16 e 3 Bq kg⁻¹ nas camadas de 0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m de profundidade, respectivamente. Os coeficientes determinados para as referidas árvores frutíferas variou de 0,21% para macieira até 3,2% para aveleira (205 Bq kg⁻¹ de fruto fresco).

Ambler & Menzel, citados por Nielsen (1981), realizaram experimentos com 12 espécies vegetais contaminadas com ^{89}Sr e relataram uma grande variação entre os coeficientes de translocação destas espécies.

Em uma série de experiências realizadas pelo Laboratório de Pesquisa em Radiobiologia Agrícola do Reino Unido, concluiu-se que menos de 0.5% de ^{89}Sr em solução aplicada em plantas de trigo era translocado. Comparando a mobilidade do ^{89}Sr com a do ^{137}Cs no interior da planta, o estrôncio mostrou-se menos móvel.

Svensson & Lidén, citados por Nielsen (1981), mostraram que líquens e musgos representam o primeiro vínculo de existência de uma cadeia alimentar importante no ártico e regiões subárticas. Como não têm nenhum sistema de raiz, toda a captação de nutrientes ocorre pela superfície. Estimou-se que estes organismos têm 10 vezes a área de superfície relativamente a uma grama típica e que 95 % do ^{137}Cs depositado foi translocado.

Todos os experimentos relacionados com translocação, aqui citados, foram realizados sob condições ambientais controladas, geralmente em casas de vegetação. Excetua-se o trabalho de Voigt et al. (1991), que foi realizado em campo. Esta condição peculiar somente foi possível porque os contaminantes utilizados foram tomados a partir de água de enxurrada, coletada durante o *fallout* de Chernobyl.

Para o hemisfério sul, mais especificamente o Brasil, Rochedo et al. (1996) desenvolveram um modelo para regiões urbanas, o PARATI, direcionado para as condições das cidades brasileiras. No PARATI, também é empregado o conceito de deposição relativa. Assim, a atividade estimada no telhado de uma residência, coberta com telhas de amianto, será 80% da atividade do gramado padrão de $1,0 \text{ m}^2$ de área, se a deposição for seca. No caso de deposição úmida, este valor pode ser reduzido para até 50%. Assume-se que o gramado padrão está localizado sob a área de deposição e apresenta excelentes condições de desenvolvimento.

Dados relativos à translocação e transferência não foram observados na literatura para o hemisfério sul. Além disto, todos os modelos estatísticos citados,

tais como ECOSYS-87-Alemanha (Müller & Pröhl, 1993), BIOMOVs-Suécia (Köhler et al., 1991), VAMP-Grécia (Linsley et al., 1990), PARK-Áustria (Jacob et al., 1991), OECOSYS-Nova Zelândia (Gerzabek et al., 1989) e EURALERT-Comunidade Européia (Catsaros et al., 1990), foram originados em países do hemisfério norte – principalmente da Europa.

Segundo Voigt et al. (1991), a definição de translocação pode ser estendida de forma a melhor se adequar a modelos estatísticos. Assim, o autor define translocação como o quociente entre a atividade do produto colhido relativamente a uma área foliar de 1 m^2 e a atividade inicialmente depositada e retida nesta mesma área ($\text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$) ou a atividade em 1 kg da parte comestível recém colhida e a atividade inicial na mesma área foliar ($\text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$). Portanto, conhecendo-se os coeficientes de translocação e a atividade relativa dos vários contaminantes, é possível avaliar se uma dada espécie contaminada estará própria para consumo após colheita.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Solo e Plantio

O solo utilizado para plantio foi proveniente de uma área do planalto de Poços de Caldas, onde se cultivou batata um ano antes. Este procedimento de coleta de solo foi adotado uma vez que o cultivo de feijão na região é predominantemente efetuado após o da batata. Segundo Vieira (1978), o feijoeiro é uma planta muito suscetível às condições climáticas adversas, motivo pelo qual, além de razões econômicas, nem todos os plantadores empregam adubos na cultura de feijão, limitando-se a maioria ao aproveitamento do efeito residual da adubação aplicada à cultura que a antecedeu.

Segundo Malavolta (1972), citando um ensaio comparativo com ausência de adubação, adubação mineral, adubação orgânica e adubação mineral mais orgânica, os valores máximos de produtividade ocorreram para o último tratamento. Assim, ao volume de aproximadamente 1000 L de solo foram adicionados 60 L de areia grossa, 150 L de esterco de gado curtido, 40 L de húmus de minhoca, 0,8 kg de adubo 4-14-8 (4 % de nitrogênio, 14 % de fósforo e 8 % de potássio) ou super simples. Estes produtos foram adicionados ao solo para oferecer aos feijoeiros condições ótimas para seu desenvolvimento. Todos os componentes do substrato de plantio foram peneirados e, então, revolvidos por quatro vezes para garantir boa homogeneidade. A mistura final apresentou pH 7,1, teor de matéria orgânica de 34,1 %, 0,075 % de fósforo, 0,12 % de

potássio, 0,90 % de cálcio e 0,056 % de magnésio. O substrato foi acondicionado em vasos plásticos com 25 cm de diâmetro e volume interno de 5,0 L. Estes vasos foram distribuídos segundo o delineamento em blocos casualizados na casa de vegetação e regados com abundância na semana anterior à semeadura. Foi utilizado controle de temperatura durante todo o experimento, ficando restrita entre 17 °C e 24 °C. O limite inferior foi mantido por aquecedores e ventiladores associados e o limite superior por passagem forçada de ar por colméias ou *pad* umedecido com água.

O plantio foi realizado no dia 13/02/99, recebendo cada vaso quatro sementes em covas distintas, de aproximadamente 3,0 cm de profundidade, distribuídas nos vértices de um quadrado e equidistantes da borda e centro do vaso. Após o plantio, para atenuar a perda de umidade por evaporação, foi espalhada na superfície de cada vaso uma fina camada de areia grossa. No delineamento experimental adotado foram utilizados 144 vasos. Além destes, foram plantados feijões em mais 14 vasos que serviriam para substituir componentes do experimento com problemas de germinação. Foram substituídos 8 vasos que apresentaram germinação de duas sementes e 1 que apresentou germinação de uma semente. No dia 12/03/99, foi realizado desbaste dos feijoeiros, deixando-se as duas plantas mais vigorosas por vaso.

3.2 Aspersões

3.2.1 Equipamentos utilizados nas aspersões

Indubitavelmente, ao se trabalhar com substâncias radioativas, deve-se atentar para a não contaminação ocupacional e ambiental. Com este intento, foi construído um dispositivo que permitiu a aspersão dos feijoeiros com radionuclídeos, em forma de bruma, segundo normas que visam resguardar

trabalhadores e meio ambiente dos danos decorrentes da utilização, de substâncias radioativas (CNEN, 1988b). O dispositivo ou campânula, mostrado na Figura 1, foi construído em PVC e acrílico com diâmetro interno de 0,75 m e altura de 1,15 m. Coincidindo com seu eixo longitudinal e no seu ponto mais alto, foi fixado um atomizador, do tipo empregado em espectrômetro de absorção atômica, possibilitando nebulização do material radioativo sobre vegetais colocados em seu interior. No intuito de retirar o material radioativo remanescente após uma aspersão, o ar do interior da campânula foi forçado por uma bomba de vácuo a passar por um recipiente contendo carvão ativado, onde era retido. Para impedir vazamentos de material radioativo durante a aspersão, foi colada na superfície inferior da campânula uma fita emborrachada com seção transversal medindo 0,02 x 0,04 m. Durante cada aspersão, a campânula ficava apoiada sobre um recipiente confeccionado em aço inox, medindo 1,50 m x 1,50 m x 0,05 m, sobre o qual foram dadas duas demãos de tinta epoxi.

3.2.2 Procedimento para as aspersões

Durante cada tratamento foram realizadas 16 aspersões, quatro por bloco. O volume de material radioativo aspergido por vaso foi previamente pipetado e acondicionado em pequenos frascos de acrílico hermeticamente fechados.

Para aspergir os feijoeiros homogeneamente e minimizar eventuais fugas de material radioativo sob a forma de bruma, foi estabelecido um procedimento composto pela seguinte rotina:



Figura 1 – Campânula e equipamentos de proteção individual.

1. Posicionar um vaso no centro do recipiente de aço inox e colocar a campânula, resguardando para que as folhas dos feijoeiros não toquem nas paredes laterais da campânula;
2. Aspergir o conteúdo de um frasco (2.0 mL);
3. Esperar 1 minuto após aspersão para deposição do material em suspensão. Este tempo foi estabelecido em testes anteriores, nos quais o feixe de luz de um *laser-point* atravessando a bruma aspergida deixava de ser observado aproximadamente um minuto após o fim da aspersão;
4. Acionar a bomba de vácuo por três minutos. Este tempo foi estabelecido utilizando-se de ^{137}Cs como traçador em testes de aspersão. Verificou-se, através de análises de amostras de ar, que não eram significativas as atividades no ar quando a campânula era aberta transcorridos 3 minutos da aspersão, com a bomba de vácuo ligada;
5. Retirar o vaso da campânula e o papel que protege o solo do vaso. Este papel foi utilizado para evitar contaminação do solo com o material radioativo;
6. Separar o vaso e esperar pelo menos uma hora para retorná-lo ao local de origem. Este passo foi implementado para evitar a contaminação de um feijoeiro por outro recém aspergido.

3.2.3 Material radioativo aspergido

Os três radionuclídeos artificiais ^{60}Co , ^{90}Sr e ^{137}Cs , acondicionados em ampolas de vidro, foram transferidos individualmente para picnômetros e em seguida para um balão volumétrico de 250 mL. A atividade total de cada radionuclídeo no balão foi aproximadamente 25 kBq. O volume do coquetel de radionuclídeos ou material radioativo aspergido por vaso foi 2,0 mL. As atividades relativas de cada radionuclídeo são apresentadas na Tabela 1. Embora na literatura consultada as atividades destes radionuclídeos estejam além de

100 Bq mL⁻¹, optou-se por tal valor devido aos limites de dose decorrentes de ingestão e inalação.

Tabela 1. Características físico-químicas dos radionuclídeos aspergidos.

	⁶⁰ Co	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Atividade relativa (Bq mL ⁻¹)	100,3	100,9	105,4
Forma química	Co ²⁺	Sr ²⁺	Cs ⁺
Meia-vida (anos)	5.27	28.5	30.17

3.3 Planejamento Estatístico

Raramente um experimento agrônomico é realizado em um ambiente no qual se tenham condições homogêneas para as variáveis ambientais. Assim, devido a possíveis variações de intensidade de luz e temperatura no interior da casa de vegetação, optou-se pela utilização do delineamento em blocos casualizados, no qual a homogeneidade é exigida apenas dentro de cada bloco (Gomes, 1984).

O delineamento em blocos completos casualizados é composto por J blocos com I tratamentos cada, totalizando I J parcelas (Nogueira, 1997). A unidade experimental ou parcela foi composta por seis vasos com dois feijoeiros cada, dos quais quatro foram retirados aleatoriamente e aspergidos com o material radioativo. Destes, um foi retirado aleatoriamente para estimativa da atividade depositada nos três remanescentes. Dos dois vasos não aspergidos, um teve suas folhas cortadas e encaminhadas para medição de área foliar, sendo posteriormente utilizadas como branco de determinações. O outro seguiu até o fim do experimento e os feijões colhidos foram utilizados como branco nas análises.

Uma vez determinadas as atividades nas folhas e feijões dos tratamentos e blocos, aplicou-se análise estatística para cada radionuclídeo usando o software SAS (Statistical Analyses System). A Tabela 2 foi empregada para auxiliar na confirmação dos resultados e o procedimento matemático utilizado é apresentado através das equações de (1) a (26).

Tabela 2. Distribuição dos coeficientes de translocação para tratamento estatístico.

Tratamentos (níveis)	Blocos				total	média
	1	2	...	J		
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1J}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2J}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
3	y_{31}	y_{32}	...	y_{3J}	$y_{3.}$	$\bar{y}_{3.}$
...
I	y_{I1}	y_{I2}	...	y_{IJ}	$y_{I.}$	$\bar{y}_{I.}$
Total	$y_{.1}$	$y_{.2}$	$y_{.3}$	$y_{.4}$	$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

y_{ij} representa a atividade de cada radionuclídeo no tratamento i, no bloco j

$y_{.j}$ é o total do bloco j

$y_{i.}$ é o total do tratamento i

$y_{..}$ é o total geral

$\bar{y}_{i.}$ é a estimativa da média do tratamento i

$\bar{y}_{..}$ é a média geral

O modelo matemático seguido foi

$$y_{ij} = \mu + d_i + b_j + e_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \text{ e } j = 1, 2, 3, 4$$

onde:

y_{ij} é a atividade observada nos três vasos aspergidos do tratamento i , no bloco j

μ é o valor médio real

d_i é o efeito do tempo transcorrido entre o plantio e a aspersão, na atividade do fruto e mede o afastamento da média μ_i em relação a μ , ou seja:

$$d_i = \mu_i - \mu$$

b_j é o efeito do bloco j sobre a atividade no fruto e mede o afastamento da média μ_j em relação a μ , ou seja:

$$b_j = \mu_j - \mu$$

e_{ij} é o erro aleatório atribuído à observação y_{ij} , tal que $e_{ij} \cap N(0, \sigma^2)$ e independentes

A hipótese da nulidade assume que a translocação folha-fruto é uma constante e a hipótese alternativa que a translocação no feijoeiro varia com o intervalo de tempo entre plantio e contaminação. Matematicamente são representadas por

$$H_0 \Rightarrow \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$$

$$H_a \Rightarrow \mu_i \neq \mu_{i'} \quad \text{para pelo menos um } i \neq i'$$

que serão testadas através da análise da variância com aplicação do teste F, segundo a Tabela 3.

Tabela 3. Análise de variância com aplicação de teste F para tratamentos.

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Tratamentos	I-1	SQ_{trat}	QM_{trat}	$QM_{\text{trat}}/QM_{\text{res}}$
Blocos	J-1	SQ_{blocos}	QM_{blocos}	
Resíduo	(I-1)(J-1)	SQ_{res}	QM_{res}	
Total	IJ-1	SQ_{total}		

onde

$$SQ_{\text{total}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{IJ} \quad (1)$$

$$SQ_{\text{trat}} = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^I y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{IJ} \quad (2)$$

$$SQ_{\text{blocos}} = \frac{1}{I} \sum_{j=1}^J y_{.j}^2 - \frac{y_{..}^2}{IJ} \quad (3)$$

$$SQ_{\text{res}} = SQ_{\text{total}} - SQ_{\text{trat}} - SQ_{\text{blocos}} \quad (4)$$

$$QM_{\text{trat}} = \frac{SQ_{\text{trat}}}{I-1} \quad (5)$$

$$QM_{\text{blocos}} = \frac{QM_{\text{blocos}}}{J-1} \quad (6)$$

$$QM_{res} = \frac{SQ_{res}}{(I-1)(j-1)} \quad (7)$$

$$F_0 = \frac{SQ_{trat}/(I-1)}{SQ_{res}/(I-1)(J-1)} = \frac{QM_{trat}}{QM_{res}} \quad (8)$$

Assim, decide-se pela rejeição de H_0 , ao nível α de significância quando

$$Qmtrat/Qmres = F_0 \geq F_{(\alpha, I-1, (I-1)(J-1))} \quad (9)$$

onde $F_{(\alpha, I-1, (I-1)(J-1))}$ é obtido na tabela do teste F-Snedecor, com $(I-1)$ e $(I-1)(J-1)$ graus de liberdade associados ao numerador e denominador de F_0 , respectivamente. Caso H_0 não seja rejeitada, então o coeficiente de translocação para feijoeiro será constante e poderá ser determinado a partir da média dos valores obtidos de μ_i para os quatro blocos.

Rejeitada a hipótese da nulidade, devem-se isolar os $I-1$ graus de liberdade dos tratamentos a fim de avaliar separadamente os efeitos de 1º grau ou linear, de 2º grau ou quadrático, de 3º grau ou cúbico e 4º grau. Para tanto, são aplicados testes F para cada regressão, tomando-se a regressão significativa de maior grau, independentemente da existência de regressões não significativas de menor grau (Gomes, 1990). A Tabela 4 mostra a estatística para analisar as regressões até 3º grau.

Tabela 4. Análise de variância com aplicação de teste F para regressão polinomial.

Causa de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Regressão linear	1	SQreglin	QMreglin	SQreglin/QMres
Regr quadrática	1	SQregquad	QMregquad	SQregquad/QMres
Regressão cúbica	1	SQregcub	QMregcub	SQregcub/QMres
Tratamento	I-1	SQtrat	QMtrat	
Resíduo	(I-1)(J-1)	SQres	QMres	
Total	IJ-1			

$$SQ_{reg.k} = \frac{\sum_{i=1}^n P_k(X_i = T_i) y_i)^2}{J \sum_{i=1}^n P_k^2(X_i = T_i)} \quad (10-a)$$

ou

$$SQ_{reg.k} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ki} y_i}{J \sum_{i=1}^n C_{ki}^2} \quad (10-b)$$

$P_k(X_i=T_i)$ ou C_{ki} são os coeficientes de interpolação de polinômios ortogonais que obedecem às seguintes condições:

$$P_0(X_i) = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n P_k(X_i) = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n P_k(X_i) P_{k'}(X_i) = 0 \text{ para } k \neq k' \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^p P_k^2(X_i) \neq 0 \quad (14)$$

O $QM_{reg k}$ e o valor de F são determinados por

$$QM_{reg k} = \frac{SQ_{reg k}}{1} \quad (15)$$

$$F_0 = \frac{QM_{reg k}}{QM_{res}} \quad (16)$$

Desta forma, rejeita-se H_0 ao nível α de significância quando

$$F_0 \geq F_{(\alpha, 1, m)} \quad (17)$$

onde $F_{(\alpha, 1, m)}$ é obtido em tabela de teste F.

Determinado o grau do polinômio de regressão, deve-se proceder à determinação de seus coeficientes. O modelo matemático de regressão polinomial de grau p para uma única variável independente utilizado foi

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \beta_3 X_i^3 + \dots + \beta_p X_i^p + \varepsilon_i \quad (18)$$

Como os níveis referentes aos tratamentos são equidistantes, ou seja,

$$X_1=X_1; X_2=X_1+q; X_3=X_2+q \dots X_n=X_{n-1}+q$$

então, o modelo de regressão polinomial pode ser expresso por

$$y_i = b_0 + b_1 P_1(X_i) + b_2 P_2(X_i) + \dots + b_p P_p(X_i) + \varepsilon_i$$

$$\text{com } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (19)$$

onde:

- n é o número de pares de dados
- b_0, b_1, \dots, b_p são parâmetros da regressão a estimar
- $P_k(X_i)$ polinômios ortogonais de ordem $k = 1, 2, \dots, p$

Os valores de $P_k(X_i)$, $k=1, 2, \dots, p$, quando os tratamentos ou níveis da variável X são equidistantes, podem ser obtidos em Gomes (1990), ou seja

$$P_1(x) = \frac{x - \bar{X}}{q} \quad (20)$$

sendo
$$\bar{X} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I X_i \quad (21)$$

$$P_2(x) = P_1(x)^2 - \frac{n^2 - 1}{12} \quad (22)$$

$$P_3(x) = P_1(x)^3 - \frac{3n^2 - 7}{20} P_1(x) \quad (23)$$

$$P_4(x) = P_1(x)^4 - \frac{3n^2 - 13}{14} P_1(x)^2 + \frac{3(n^2 - 1)(n^2 - 9)}{560} \quad (24)$$

Através da aplicação do método dos quadrados mínimos, obtém-se \hat{b}_k , um estimador de mínimos quadrados de b_k , com $k = 1, 2, \dots, p$ cuja estimativa é dada por

$$\hat{b}_k = \frac{\sum_{i=1}^n P_k(X_i = T_i) y_i}{J \sum_{i=1}^n P_k^2(X_i = T_i)} \quad (25)$$

Desta forma, a expressão para a relação entre translocação e tempo transcorrido entre plantio e aspersão pode ser expressa por

$$\hat{y}_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 P_1(X_i) + \hat{b}_2 P_2(X_i) + \dots + \hat{b}_p P_p(X_i) \quad (26)$$

4.4 Análise Estatística

Os valores dos coeficientes de translocação do ^{60}Co , ^{90}Sr e ^{137}Cs em feijoeiro foram analisados seguindo os procedimentos estatísticos do delineamento em blocos casualizados, através do software SAS (Statistical Analysis System). A hipótese da nulidade para os três radionuclídeos aspergidos foi a não existência de dependência temporal entre coeficientes de translocação e

tempo transcorrido entre aspersão e plantio. A hipótese alternativa assumiu a dependência entre as referidas grandezas. Se a hipótese da nulidade for validada, então, pode-se concluir que os coeficientes de translocação serão estatisticamente iguais para qualquer momento de aspersão do traçador. Por outro lado, caso a hipótese da nulidade seja rejeitada, a dependência entre coeficiente de translocação e tempo transcorrido entre plantio e aspersão será avaliada através da análise de regressão polinomial com aplicação de teste F. Serão avaliadas regressões de até quarto grau, sendo utilizada aquela de maior grau estatisticamente significativa após aplicação de teste F.

3.5 Métodos de análise

3.5.1 Preparação de amostras e padrões

As massas das amostras de folhas, para avaliação da deposição inicial, e de feijões, para determinação da atividade no fruto, foram medidas em balança eletrônica e encaminhadas para secagem a 110 °C até massa constante. Todas as amostras foram trituradas, as folhas em gral de porcelana e os feijões em moinho orbital, sendo acondicionadas em frascos plásticos.

As amostras de folhas para estimativa da área foliar foram tomadas logo após cada aspersão. Foram colhidas todas as folhas dos pés de um vaso, inclusive as de pequenas dimensões ou recém germinadas, suas áreas digitalizadas e determinadas através de programa computacional da Kontron Elektronik Imaging System versão KS 300.

O padrão utilizado nas determinações de ^{60}Co e ^{137}Cs foi preparado a partir da adição e distribuição homogênea de 2 mL do contaminante em 50 g de folhas de feijoeiro recém colhidas. Posteriormente, foram submetidas à secagem até massa constante. A massa resultante (8,76 g) foi triturada, distribuída

uniformemente no frasco de detecção e prensada, ficando com diâmetro de 61 mm e altura de 3 mm.

3.5.2 Espectrometria gama de alta resolução

Foi empregada espectrometria gama para determinação de ^{60}Co e ^{137}Cs . Suas atividades foram medidas por detecção direta dos raios gama característicos destes radionuclídeos, 1173,21 keV e 1332,47 keV para ^{60}Co e 661,67 keV para o ^{137}Cs , através da interação da radiação com o material do detector de estado sólido. O espectrômetro gama constitui-se de um detector semicondutor de germânio hiperpuro (marca Canberra, modelo GX 4519, com 45% de eficiência do detector de NaI de 3x3 polegadas), eletrônica associada (pré-amplificador, amplificador, discriminador, fonte de alta tensão), blindagem, conversor analógico digital e analisador multicanal, além do software Gennie-2000 da Canberra.

3.5.3 Determinação radioquímica do ^{90}Sr

Foi utilizada a separação radioquímica para determinação de ^{90}Sr (HED, 1994). Após serem realizadas as determinações de ^{60}Co e ^{137}Cs , foram tomadas alíquotas de, no máximo, 0,01 kg de cada amostra e, então, calcinadas em cadinhos de platina a 450 °C por 24 h. Após a calcinação, as alíquotas foram submetidas a abertura por ataque ácido durante 48 h com ácidos nítrico, sulfúrico e fluorídrico em béqueres de teflon. Posteriormente, foram levadas à secura e avolumadas para 50 mL de solução de HNO_3 1 N. A esta solução foram adicionados 10 mL de óxido de ítrio em meio aquoso ($2,0 \text{ mg mL}^{-1}$), utilizado como carreador. A extração do ^{90}Y da amostra foi feita por meio de um trocador iônico líquido, o DEHPA. O ^{90}Y , extraído para a fase orgânica, foi reextraído

para a fase aquosa com ácido clorídrico 9N. Uma extração com um trocador aniônico líquido, o aliquat-336, removeu possíveis interferentes ainda presentes. Separada a fase aquosa, o ^{90}Y foi precipitado como oxalato por adição de 8,0 mL de ácido oxálico, seguido de correção para pH 3,0 e agitação por 15 minutos. A amostra foi colocada para decantar durante uma hora, filtrada, seca e disponibilizada para determinação de atividade beta.

A atividade do ^{90}Sr foi determinada através da atividade beta do seu filho, o ^{90}Y , em um detector proporcional, com geometria 2π de 5 cm de diâmetro. O equipamento usado nas detecções dependia da atividade da amostra; as amostras de feijões, caracteristicamente de baixa atividade, foram submetidas a contadores constituídos por sistema de anticoincidência (contador proporcional com fluxo contínuo de gás, marca Eberline multi-low-level counter FHT 770T), minimizando-se o tempo entre a contactação da amostra com o orgânico (D.E.PHA) e a secagem dos filtros, pois a meia-vida do ^{90}Y é igual a 64,1 h. As amostras de folhas de feijoeiros, com atividades mais elevadas, foram submetidas à detecção no dia posterior à contactação da amostra com o orgânico em equipamento de detecção beta desprovido de sistema de anticoincidência (contador proporcional tipo GM, marca Eberline, modelo BC-4). Este procedimento foi implementado para se evitar a contaminação do equipamento destinado a amostras de baixa atividade.

Os dois equipamentos tiveram suas eficiências determinadas por detecções de padrões de ^{90}Sr . O background do BC-4 foi determinado pela média de sucessivas detecções de filtro virgem e, no caso do FHT 770T, foi utilizado como background a média de detecções de branco das determinações de ^{90}Sr .

3.6 Translocação e coeficiente de translocação

A translocação folha-fruto é quantificada através de coeficiente de translocação, definido como a fração de atividade depositada e retida nas folhas que é transferida para a parte comestível do vegetal até o momento da colheita. Não empregadas neste trabalho três formas distintas para determinação de coeficiente de translocação.

1) A primeira maneira de se determinar o coeficiente de translocação restringe-se ao quociente entre a atividade específica no fruto seco e a atividade específica depositada e retida pelas folhas, ou seja:

$$\text{Definição 1: } Tr_1 = A_{\text{esp fruto}}/A_{\text{esp folha}} \quad (\text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1})$$

sendo a atividade na folha e fruto medida após secagem até massa constante;

2) A segunda maneira refere-se ao quociente entre a atividade no fruto e nas folhas relativas a uma área foliar de 1 m^2 , ou seja:

$$\text{Definição 2: } Tr_2 = (A_{\text{total fruto}}/S)/(A_{\text{total folha}}/S) \quad (\text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2})$$

onde S é a área foliar sobre a qual é tomada a atividade total depositada. Embora esta segunda forma de definir translocação cite uma área foliar de 1 m^2 , pode-se tomar qualquer valor de área, uma vez que ela aparece como divisor no numerador e denominador. A referência na literatura a tal valor de área deve ocorrer pelo fato de ser este o padrão de medida tomado para modelagem de contaminações urbanas e rurais;

- 3) A terceira maneira refere-se ao quociente entre a atividade em 1 kg de fruto fresco e a atividade em 1 m² de folha, ou seja:

Definição 3:
$$Tr_3 = A_{\text{esp 1 kg fruto fresco}} / (A_{\text{total folha}}/S) \quad (\text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2})$$

3.7 Proteção radiológica

A atividade de cada radionuclídeo empregado em uma única aspersão foi aproximadamente 200 Bq, distribuída em forma de bruma no interior da câmara, de volume interno de aproximadamente 0,4 m³. A concentração no ar derivada (CAD) é 6·10⁷ Bq m⁻³ para ⁶⁰Co, 3·10² Bq m⁻³ para ⁹⁰Sr e 2·10³ Bq m⁻³ para ¹³⁷Cs (CNEN, 1988a). Supondo que todo o material radioativo aspergido fosse distribuído uniformemente no interior da câmara, então, a concentração dos radionuclídeos em relação à CAD seria 8,3·10⁻⁶ CAD para ⁶⁰Co, 1,66 CAD para ⁹⁰Sr e 0,25 CAD para ¹³⁷Cs. Assim, foram utilizados equipamentos de proteção individual (Figura 1) em decorrência do valor da concentração no ar de ⁹⁰Sr ser maior que a CAD.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desenvolvimento da cultura e colheita

De maneira geral, o desenvolvimento dos feijoeiros foi considerado normal até o quinquagésimo dia após o plantio conforme pode ser observado nas Figuras 2 e 3.

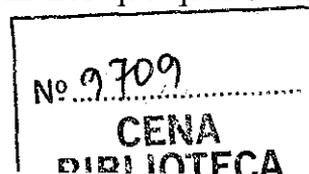


Figura 2. Feijoeiros, 30 dias após plantio.



Figura 3 – Feijoeiros, 45 dias após o plantio.

Nesta época, foi observado enrugamento ou encrespamento das folhas apicais em quase todos os feijoeiros e, de forma mais amena, manchas amarelas distribuídas aleatoriamente nas folhas mais velhas trifoliadas. Poucos dias após, descobriu-se que a maior parte dos feijoeiros era portadora de dois vírus; um conhecido vulgarmente por mosaico comum, transmitido pelo vetor *Mysus persicae* e *Aphis fabae* (pulgões) ou por utilização de semente contaminada, e o outro denominado mosaico dourado, transmitido pelo vetor *Bemisia tabaci* (mosca branca). Embora a aparência dos feijoeiros infestados com mosaico dourado apresente semelhanças com os sintomas de carência de magnésio, o ataque por vírus pode ser confirmado pela presença do seu vetor, a mosca branca (Rosolem & Marabayashi, 1994). Além disto, a concentração de magnésio no substrato de plantio foi 20 mmol dm^{-3} , pouco menos que quatro vezes o mínimo



recomendado para cultura de feijoeiro (CATI, 1997). Segundo Almeida et al., citados por Tulmann Neto (1979), as perdas em produtividade causadas pelo mosaico dourado no cultivar carioca foram 43 % para ataque tardio e 73 % para ataque precoce.



Figura 4 - Folhas de feijoeiro e gema apical com mosaico comum.

A sintomatologia do mosaico comum é variada e depende da estirpe do vírus, da época de infecção e da variedade de feijoeiro. Destes fatores, também vai depender a produtividade. A transmissão da doença geralmente ocorre por

pulgões, porém quando o ataque é generalizado a probabilidade maior é de infestação através da semente (Costa & Rosseto, 1972).



Figura 5. Folhas de feijoeiro com mosaico dourado.

Aproximadamente no quinquagésimo dia após o plantio, teve início um processo de abortagem de inflorescências e pequenas vagens. Por volta do sexagésimo dia, quase todos os feijoeiros apresentavam folhas amarelas, caracterizando a infestação do mosaico dourado e, posteriormente, constatou-se início precoce de translocação de nutrientes folha-fruto.

No septuagésimo quinto dia (quarta aspersão), havia poucas folhas verdes nos feijoeiros. Na semana seguinte, já foi possível constatar o fim do

processo vegetativo, quando em condições normais deveria estar iniciando o processo de translocação de nutrientes.

As condições térmicas foram mantidas controladas entre 17 e 24 °C. Quanto à umidade dos vasos, foram tomados cuidados adicionais, uma vez que o feijoeiro é muito sensível ao déficit hídrico, provavelmente devido à sua baixa capacidade de recuperação às estiagens e ao sistema radicular pouco desenvolvido. O estágio de maior sensibilidade é o de floração, com aborto e abscisão das flores (Guimarães, 1988). Assim, eram regados apenas os vasos que apresentavam início de endurecimento da superfície do solo, exceto na época de floração na qual as regas foram intensificadas. Este procedimento mostrou-se eficaz, pois, em alguns vasos deixados para teste, foi observado que o solo abaixo de 0,03 m da superfície apresentava-se úmido quando nesta condição.

A antecipação da colheita, no nonagésimo dia, foi atribuída basicamente ao ataque dos vírus, principalmente ao mosaico comum. O mosaico comum, nesta cultura, causou danos principalmente às gemas apicais, atrofiando-as e conseqüentemente impedindo a formação de novas vagens. Tal fato pode ser comprovado pelo aborto generalizado de inflorescências e pequenas vagens, além da interrupção do crescimento vegetativo. Neste experimento, a produtividade foi inferior à que se teria caso não houvesse ataque deste vírus. Foram colhidos 2,25 kg de feijão em 128 vasos (256 feijoeiros). Segundo Galvez & Cardeñas, citados por Faria (1988), a produtividade será tão afetada quanto mais próximo do plantio ocorrer a infestação.

Cada amostra de feijão, ou tratamento e respectiva repetição, foi devidamente identificada, acondicionada em pequenos sacos plásticos, sua massa medida e levada à secura até massa constante. Em seguida, foram trituradas e acondicionadas na geometria de interesse para as determinações dos radionuclídeos emissores gama e posteriormente calcinadas para determinações de ^{90}Sr .

4.2 Deposição e retenção dos radionuclídeos

Os coeficientes de translocação foram definidos como a fração de atividade depositada e retida nas folhas que é transferida para a parte comestível do vegetal até o momento da colheita. O valor médio da fração de atividade retida nos dois feijoeiros de cada vaso, após aspersão, é apresentado na Tabela 5. Este valor foi obtido através da comparação das atividades aspergidas com as atividades nas folhas dos feijoeiros, tomadas para estimativa da deposição inicial. Estas frações mostram que segundo as condições experimentais de aspersão o feijoeiro retém, no máximo, 4 % do material aspergido, independentemente do seu estágio de desenvolvimento fisiológico.

Tabela 5. Atividade aspergida e retida por vaso (dois feijoeiros).

	^{60}Co	^{90}Sr	^{137}Cs
A = Atividade total aspergida por vaso (Bq)	200,3	201,8	210,8
B = Atividade retida média por vaso (Bq)	$10,7 \pm 3,6$	$11,85 \pm 4,4$	$11,1 \pm 3,7$
$B A^{-1}$ (%)	$5,3 \pm 1,7$	$5,8 \pm 2,2$	$5,3 \pm 1,8$

4.3 Proteção radiológica

O procedimento utilizado para não contaminação ocupacional e ambiental foi eficiente. A comprovação de tal fato se deu através de determinações de atividade no solo de plantio e filtros de ar. A amostra de solo

conjunto composto por alíquotas de solo de todos os vasos aspergidos. As amostras de ar foram tomadas através da filtragem de ar por amostradores de baixo ($2,0 \text{ L min}^{-1}$), médio (50 L min^{-1}) e alto fluxo (1600 L min^{-1}). As amostras foram analisadas por espectrometria gama por período nunca inferior a 12 horas, não apresentando contagens nos fotopicos correspondentes aos radionuclídeos ^{60}Co e ^{137}Cs . Como as atividades dos três radionuclídeos eram semelhantes, a contaminação ambiental e ocupacional com ^{90}Sr foi descartada por simples comparação.

4.4 Resultados das determinações

As amostras de folhas de feijoeiro e de feijões foram analisadas minimizando-se o tempo entre duas determinações de um mesmo tratamento. Este procedimento foi empregado para evitar correções de meia-vida dos radionuclídeos utilizados nas aspersões. A identificação, massa úmida, massa seca e área foliar das amostras de feijões e folhas encontram-se na Tabela 6.

As massas das amostras de feijões utilizadas nas determinações de ^{60}Co e ^{137}Cs não foram superiores a 17 g devido às limitações impostas pela geometria de detecção. A massa das amostras de folhas de feijoeiro, analisadas para estimativa da atividade retida, foi limitada entre a massa utilizada como padrão (8,76 g) e o mínimo de 6,0 g. Nas amostras com massa inferior a este valor, adicionou-se massa foliar inerte até atingir a massa do padrão e, conseqüentemente, maior semelhança entre as geometrias da amostra e padrão.

Os resultados referentes às três formas de definição de determinação de coeficientes de translocação são apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 6. Resultados das medidas de massa úmida e seca e área foliar.

Código da amostra	Aspersão (dias após plantio)	Massa seca grãos 3 vasos (g)	Massa úmida grãos 3 vasos (g)	Massa seca folhas 1 vaso (g)	Área foliar 1 vaso (m ²)
t1r1	30	56,7	64,6	4,13	0,121
t1r2	30	47,8	54,2	2,53	0,110
t1r3	30	56,9	65,4	3,31	0,093
t1r4	30	40,3	46,6	3,20	0,112
t2r1	45	57,2	64,6	13,5	0,362
t2r2	45	51,7	58,9	12,7	0,353
t2r3	45	58,7	66,9	9,76	0,437
t2r4	45	46,1	52,3	9,93	0,271
t3r1	60	57,9	65,7	10,5	0,486
t3r2	60	53,6	61,0	8,49	0,443
t3r3	60	53,3	61,7	12,7	0,489
t3r4	60	53,7	61,1	9,71	0,481
t4r1	75	62,9	72,1	2,55	0,096
t4r2	75	67,3	77,9	8,76	0,312
t4r3	75	55,3	64,3	9,31	0,351
t4r4	75	60,7	69,3	3,27	0,119

Tabela 7. Atividade específica do ^{60}Co nas folhas e fruto e coeficientes de translocação.

Código da amostra	Aspersão (dias após plantio)	Atividade inicial ^{60}Co 1 vaso (Bq kg^{-1})	Atividade no fruto ^{60}Co 3 vasos (Bq kg^{-1})	Tr_1 ($\text{mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$)	Tr_2 ($\text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$)	Tr_3 ($\text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$)
t1r1	30	3963±52	63 ± 3	16.53	0.076	0.43
t1r2	30	6332± 185	111 ± 2	18.23	0.115	0.70
t1r3	30	4603±55	88 ± 1	19.88	0.114	0.49
t1r4	30	4297±162	93 ± 2	22.51	0.095	0.68
t2r1	45	1572±26	161 ± 2	106.51	0.151	2.53
t2r2	45	2465±85	296 ± 3	124.88	0.170	3.05
t2r3	45	3825±49	319 ± 5	86.73	0.174	3.42
t2r4	45	3572±81	372 ± 15	108.31	0.168	2.62
t3r1	60	3313±40	201 ± 1	63.10	0.117	2.59
t3r2	60	4724±155	227 ± 34	49.97	0.105	2.30
t3r3	60	3189±53	240 ± 9	78.27	0.110	2.61
t3r4	60	5007±60	376 ± 9	78.10	0.144	3.41
t4r1	75	2520±51	9 ± 1	3.71	0.031	0.12
t4r2	75	1861±42	14 ± 1	7.82	0.020	0.24
t4r3	75	2437±93	29 ± 1	12.38	0.025	0.40
t4r4	75	3829±153	7 ± 1	1.90	0.012	0.06

Tabela 8. Atividade específica do ^{137}Cs nas folhas e fruto e coeficientes de translocação.

Código da amostra	Aspersão (dias após plantio)	Atividade inicial ^{137}Cs 1 vaso (Bq kg^{-1})	Atividade no fruto ^{137}Cs 3 vasos (Bq kg^{-1})	Tr_1 (%) ($\text{mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$)	Tr_2 ($\text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$)	Tr_3 ($\text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$)
t1r1	30	4225± 125	59±2	13.96	0.064	0.36
t1r2	30	6643± 325	89±2	13.40	0.084	0.51
t1r3	30	4885± 129	80±1	16.38	0.094	0.40
t1r4	30	4517± 281	99±2	21.92	0.092	0.66
t2r1	45	1683 ± 44	169±5	100.42	0.142	2.38
t2r2	45	2567± 212	264±18	102.84	0.139	2.50
t2r3	45	3691± 85	362±11	98.08	0.197	3.86
t2r4	45	3435± 209	378±24	110.04	0.170	2.65
t3r1	60	3394± 91	192±17	56.57	0.104	2.32
t3r2	60	4866± 296	270±6	55.49	0.117	2.55
t3r3	60	3127± 128	284±17	90.82	0.127	3.02
t3r4	60	4911±134	412±12	83.89	0.155	3.66
t4r1	75	2690± 131	23±1	8.55	0.070	0.28
t4r2	75	1975±69	30±02	15.19	0.039	0.47
t4r3	75	2580± 165	71±3	27.52	0.054	0.89
t4r4	75	4092± 263	24±1	5.87	0.036	0.19

Tabela 9. Atividade específica do ^{90}Sr nas folhas e fruto e coeficientes de translocação (*LD = 0,048 cps).

Código da amostra	Aspersão (dias após plantio)	Atividade inicial ^{90}Sr 3 vasos (Bq kg^{-1})	Atividade no fruto ^{90}Sr 3 vasos (Bq kg^{-1})	Tr_1 (%) ($\text{mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$)	Tr_2 ($\text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$)	Tr_3 ($\text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$)
t1r1	30	3742	< LD*			
t1r2	30	6651	< LD*			
t1r3	30	4570	< LD*			
t1r4	30	5008	6.1±1.4	1,21	0,0048	0,015
t2r1	45	1618	< LD*			
t2r2	45	2425	< LD*			
t2r3	45	4066	6.1±1.4	1,50	0,0030	0,029
t2r4	45	3541	7,7±1.6	2,17	0,0033	0,033
t3r1	60	3249	6.1±1.4	1,87	0,0035	0,019
t3r2	60	4404	< LD*			
t3r3	60	4257	< LD*			
t3r4	60	5565	< LD*			
t4r1	75	3018	< LD*			
t4r2	75	1758	< LD*			
t4r3	75	2815	< LD*			
t4r4	75	6094	< LD*			

As eficiências utilizadas nas determinações de ^{137}Cs e ^{60}Co foram 4,45 % para 661,67 keV (^{137}Ba , $\gamma = 84.95$ %), 2,46 % para 1173,21 keV (^{60}Co , $\gamma = 99.90$ %) e 2,22 % para 1332,47 keV (^{60}Co , $\gamma = 100$ %). A equação de eficiência empregada foi

$$\ln(Ef) = 34.40 - 27,7\ln E + 7,988\ln E^2 - 1,007\ln E^3 + 4,597\ln E^4$$

onde Ef é a eficiência e E a energia em keV.

A massa utilizada nas determinações de ^{90}Sr foi limitada a 10 g, uma vez que massas maiores emulsionam a solução após a contactação com o trocador aniônico, o alíquot-336, dificultando a separação.

Apenas quatro amostras de feijão apresentaram atividade de ^{90}Sr suficiente para detecção, permitindo o cálculo dos coeficientes de translocação.

As eficiências dos detectores β foram 28,4 % para o BC-4 (Eberline) e 37,4 %, 38,6 %, 38,7 %, 40,1 % e 41,0 % para os cinco detectores utilizados no FHT-770T. O rendimento químico das amostras ficou entre 73 % e 85 %.

4.5 Reavaliação do planejamento estatístico

Em decorrência dos problemas com o desenvolvimento da cultura não foi possível realizar os seis tratamentos inicialmente planejados. Desta forma, foram efetivados apenas quatro correspondentes às contaminações de 30, 45, 60 e 75 dias após o plantio. Assim, o tratamento estatístico foi redimensionado para 15 graus de liberdade para o total (soma dos graus de liberdade do resíduo, tratamentos e blocos) e 9 graus de liberdade para o resíduo.

A redução de tratamentos diminuiu o número de graus de liberdade total e do resíduo para os três radionuclídeos, ainda assim foi realizada a análise da

variância com aplicações de testes F para ^{60}Co e ^{137}Cs e os resultados foram estatisticamente significativos (Tabelas 10 a 15). Entretanto, a ausência de dados para ^{90}Sr acentuou ainda mais esta redução dos graus de liberdade total e do resíduo, impossibilitando a análise de regressão para os coeficientes de translocação de ^{90}Sr .

Segundo Gomes (1990), os graus de liberdade do resíduo e total podem ser estabelecidos pela experiência do pesquisador e dependerão da magnitude do erro aceito e da variabilidade do material em estudo. Em geral, tem-se como regra prática que o número mínimo de parcelas que irá compor um experimento é 20 e que o erro experimental ou resíduo deve ter, no mínimo, 10 graus de liberdade. Neste experimento, o número de parcelas foi 16, portanto, 15 graus de liberdade no total e 9 graus de liberdade para o resíduo.

Para a análise dos dados foi elaborado um programa estatístico para o SAS (Anexo A) com aplicações de testes F conforme descrito no tratamento estatístico. Foram realizadas correções no programa devido à redução do número de tratamentos. Os resultados para H_0 – igualdade de translocações entre tratamentos e análise de regressão polinomial – foram rejeitados com $p > F$ nunca superiores a 5%.

4.6 Análise estatística

Os resultados da análise estatística obtidos através do SAS para a translocação de ^{60}Co e ^{137}Cs em feijoeiro, de acordo com as definições 1, 2 e 3, são reportados nas Tabelas 10 a 15. Os seis testes F aplicados para avaliação da dependência temporal da translocação tiveram a hipótese da nulidade rejeitada e, conseqüentemente, a hipótese alternativa aceita. A $p > F$ para a hipótese da nulidade foi rejeitada ao nível $\alpha > 0,01$ de significância, concluindo-se pela

existência do efeito do tempo transcorrido entre plantio e aspersão sobre os coeficientes de translocação para os referidos radionuclídeos e definições.

Tabela 10. Análise de variância com teste F para translocação (definição 1) e regressão polinomial com teste F para ^{60}Co .

Causa da variação	Graus de liberdade	SQ	QM	F	p>F
Tratamentos	3	25382	8460,6	58,17	0,0001
Blocos	3			0,13	0,93
Regressão linear	1	56,97	56,97	8,31	0,018
Regressão quadrática	1	1209,2	1209,2	151,15	0,0001
Regressão cúbica	1	2197,4	2197,4	15,05	0,0037
Resíduo	9	2201,5	244,6		
Total	15	26753			

Tabela 11. Análise de variância com teste F para translocação (definição 1) e regressão polinomial com teste F para ^{137}Cs .

Causa da variação	Graus de liberdade	SQ	QM	F	p>F
Tratamentos	3	22460	7486,6	74,96	0,0001
Blocos	3			1,67	0,241
Regressão linear	1	282,0	282,0	2,79	0,129
Regressão quadrática	1	20690	20690	205,52	0,0001
Regressão cúbica	1	1667	1667	16,57	0,0028
Resíduo	9	904,4	100,5		
Total	15	24052			

Tabela 12. Análise de variância com teste F para translocação (definição 2) e regressão polinomial com teste F para ^{60}Co .

Causa da variação	Graus de liberdade	SQ	QM	F	p>F
Tratamentos	3	0,0430	0,0143	62,28	0,0001
Blocos	3	0,00036	0,00012	0,52	0,68
Regressão linear	1	0,0158	0,0157	68,45	0,0001
Regressão quadrática	1	0,0265	0,0265	115,02	0,0001
Regressão cúbica	1	0,00077	0,00077	3,37	0,0998
Resíduo	9	0,00207	0,000230		
Total	15	0,04545			

Tabela 13. Análise de variância com teste F para translocação (definição 2) e regressão polinomial com teste F para ^{137}Cs .

Causa da variação	Graus de liberdade	SQ	QM	F	p>F
Tratamentos	3	0,02877	0,00959	27,38	0,0001
Blocos	3	0,00176	0,00059	1,68	0,24
Regressão linear	1	0,00378	0,00378	10,79	0,0094
Regressão quadrática	1	0,02387	0,02387	68,14	0,0001
Regressão cúbica	1	0,00112	0,00112	3,21	0,106
Resíduo	9	0,003153	0,000350		
Total	15	0,03369			

Tabela 14. Análise de variância com teste F para translocação (definição 3) e regressão polinomial com teste F para ^{60}Co .

Causa da variação	Graus de liberdade	SQ	QM	F	p>F
Tratamentos	3	23,883	7,9611	66,72	0,0001
Blocos	3	0,2379	0,0793	0,66	0,594
Regressão linear	1	0,3315	0,3315	2,78	0,129
Regressão quadrática	1	23,5467	23,5467	197,35	0,0001
Regressão cúbica	1	0,0053	0,0053	0,04	0,838
Resíduo	9	1,07385	0,11932		
Total	15	25,195			

Tabela 15. Análise de variância com teste F para translocação (definição 3) e regressão polinomial com teste F para ^{137}Cs .

Causa da variação	Graus de liberdade	SQ	QM	F	p>F
Tratamentos	3	22,996	7,665	42,30	0,0001
Blocos	3	1,167	0,389	2,15	0,164
Regressão linear	1	0,000245	0,000245	0,00	0,97
Regressão quadrática	1	22,992	22,992	126,87	0,0001
Regressão cúbica	1	0,0042	0,0042	0,02	0,882
Resíduo	9	1,6309	0,1812		
Total	15	25,794			

4.7 Análise de regressão

Prosseguindo na análise estatística, efetuou-se a análise de regressão polinomial, considerando a regressão significativa de maior grau. Em seguida, foram obtidos os coeficientes de cada polinômio apresentados nas equações (27) a (32). Nas Figuras 6 a 11, são apresentadas as funções $Tr_n(t)$ e suas respectivas representações gráficas.

Os resultados obtidos para a expressão da relação entre coeficientes de translocação e instante de aspersão, equações (27) a (32) e Figuras 6 a 11, indicam que a regressão polinomial foi a escolha correta, ficando os coeficientes de correlação para as regressões acima de 0,96.

$${}^{60}\text{Co} \quad Tr_1(t) = 0,005196 t^3 - 0,9834 t^2 + 57,39 t - 957,3 \quad \text{mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1} \quad (27)$$

$${}^{137}\text{Cs} \quad Tr_1(t) = 0,00451 t^3 - 0,870 t^2 + 51,74 t - 874,48 \quad \text{mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1} \quad (28)$$

$${}^{60}\text{Co} \quad Tr_2(t) = -0,000181 t^2 + 0,0171 t - 0,248 \quad \text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2} \quad (29)$$

$${}^{137}\text{Cs} \quad Tr_2(t) = -0,000171 t^2 + 0,0171 t - 0,270 \quad \text{Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2} \quad (30)$$

$${}^{60}\text{Co} \quad Tr_3(t) = -0,00539 t^2 + 0,5576 t - 11,29 \quad \text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2} \quad (31)$$

$${}^{137}\text{Cs} \quad Tr_3(t) = -0,00532 t^2 + 0,5587 t - 11,50 \quad \text{Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2} \quad (32)$$

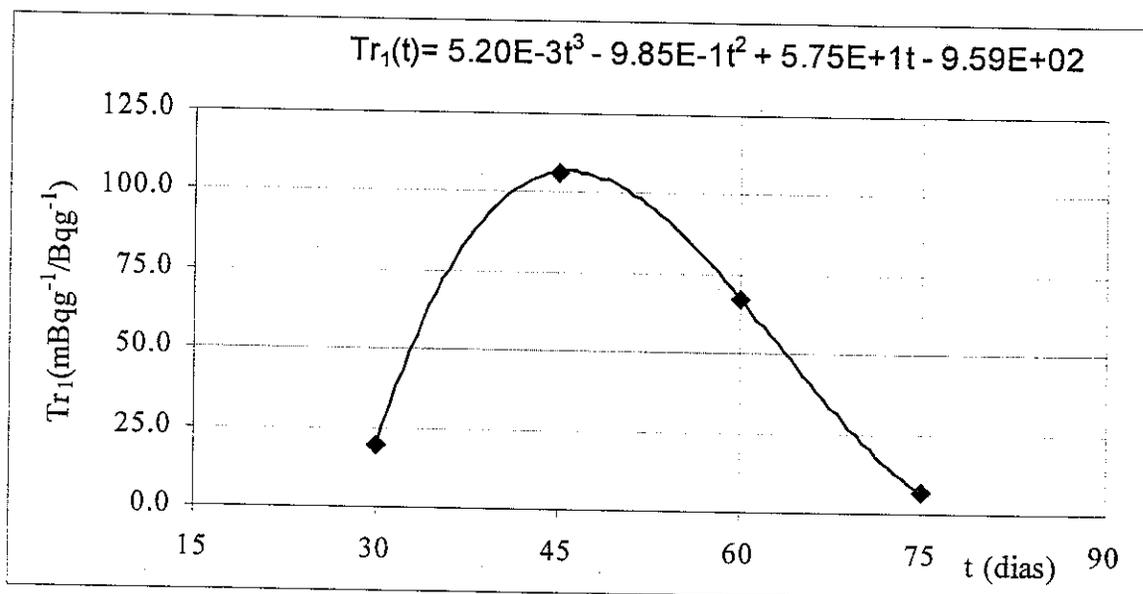


Figura 6. Curva e equação de translocação $Tr_1(t)$ de ^{60}Co em feijoeiro.

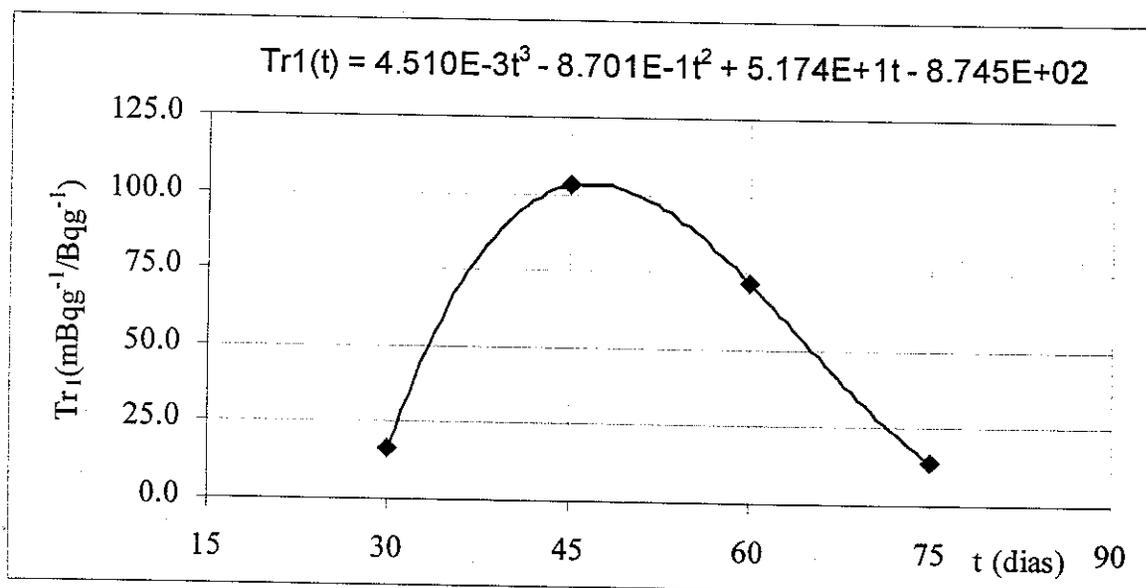


Figura 7. Curva e equação de translocação $Tr_1(t)$ de ^{137}Cs em feijoeiro.

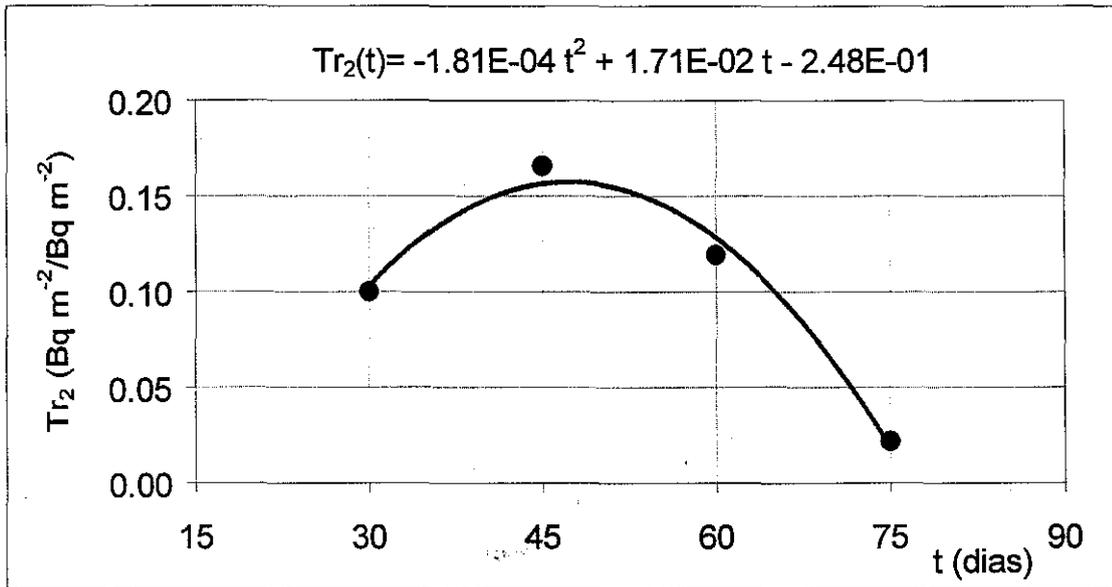


Figura 8. Curva e equação de translocação $Tr_2(t)$ de ^{60}Co em feijoeiro.

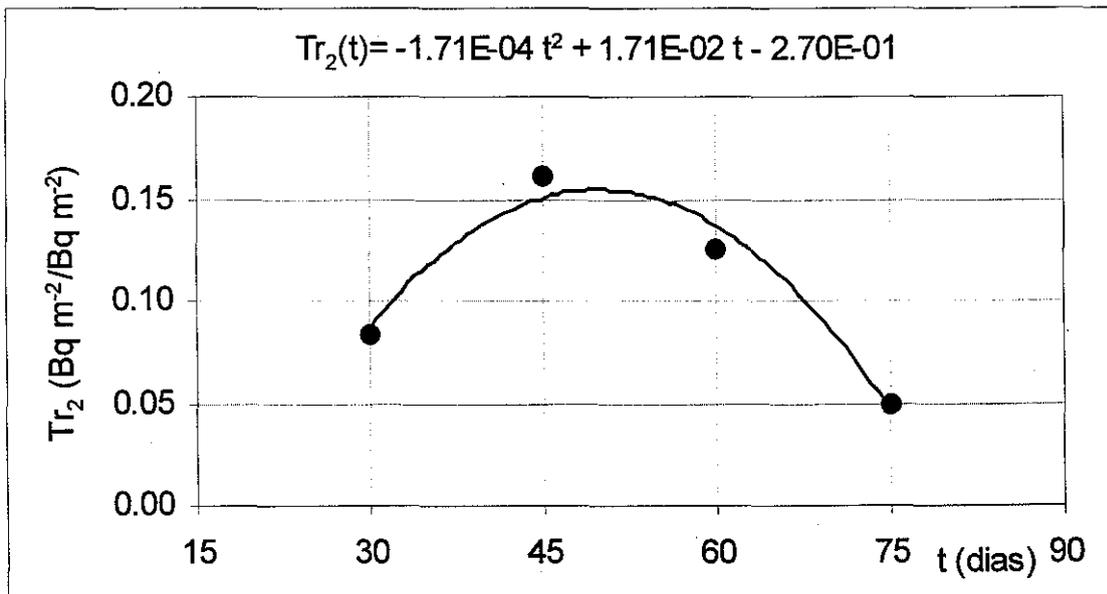


Figura 9. Curva e equação de translocação $Tr_2(t)$ de ^{137}Cs em feijoeiro.

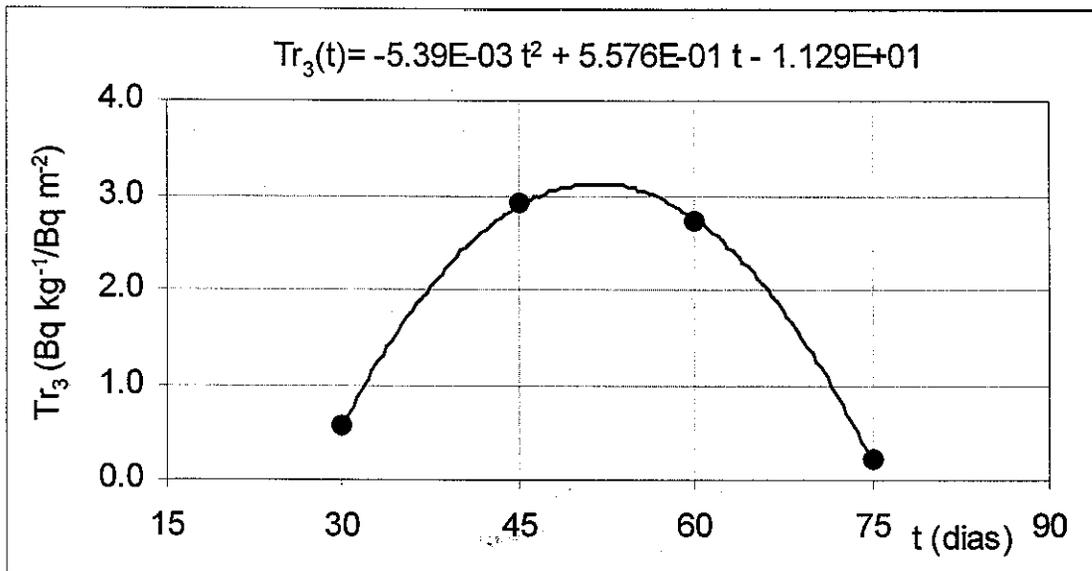


Figura 10. Curva e equação de translocação $Tr_3(t)$ de ^{60}Co em feijoeiro.

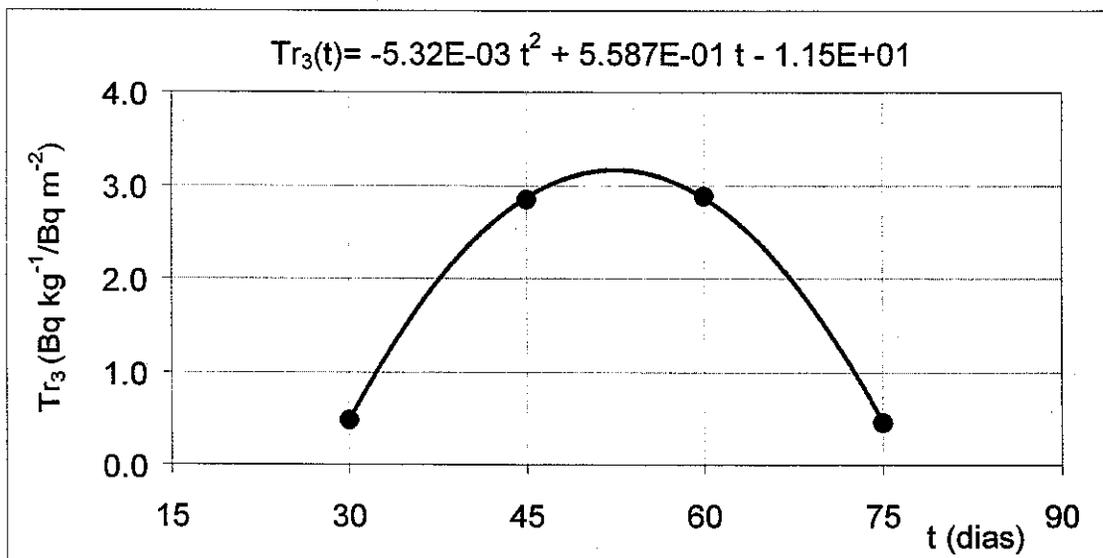


Figura 11. Curva e equação de translocação $Tr_3(t)$ de ^{137}Cs para feijoeiro.

4.8 Discussões

Normalmente, os experimentos para determinação de coeficientes de translocação fazem uso das definições 2 e 3 (Aarkrog, 1983; Voigt et al., 1991; Monte et al., 1990). Contudo, neste trabalho, além destas foi utilizada a definição 1, que pode representar um passo em direção à simplificação das determinações em laboratório, quando da eventual necessidade de emprego dos coeficientes de translocação. Embora uma suposta contaminação por *fallout* utilize valores relativos de atividade depositada em uma lavoura, haverá sempre a necessidade de comprovação. Estes valores poderão ser confirmados mais rapidamente e sem a necessidade de determinações de área foliar através da definição 1.

Comparando as relações funcionais obtidas para translocação de ^{60}Co e ^{137}Cs , nota-se que para uma mesma definição de translocação foram obtidas expressões semelhantes.

Determinando os extremos relativos das equações (27) a (32) encontram-se valores de máximos. Estes representam o número de dias passados desde o plantio, no qual a translocação de ^{60}Co e ^{137}Cs em feijoeiro é máxima. Os valores determinados para as expressões mencionadas são apresentados na Tabela 16, indicando que os máximos de translocação, independentemente da maneira como foi determinada, ocorreram entre 46 e 52 dias, ou seja, no intervalo de uma semana. No experimento de Voigt et al. (1991), o máximo de translocação para cevada ocorreu em 60 e 74 dias após o plantio, segundo cálculos a partir da definição 2 e 3, respectivamente. No caso do trigo, estes máximos ocorreram em 60 e 65 dias.

Valores menores de translocação foram obtidos para ^{90}Sr , comparativamente com ^{60}Co e ^{137}Cs . No ECOSYS-87 (Müller & Pröhl, 1993), o ^{90}Sr é classificado como de mobilidade muito baixa no interior das plantas. Já o

^{137}Cs é classificado no grupo dos elementos de maior mobilidade. Esta grandeza é tomada relativamente ao grupo de todos os elementos produtos de fissão e correlacionada com translocação. Desta forma, os resultados de ^{90}Sr e ^{137}Cs deste trabalho estão de acordo com o modelo ECOSYS-87.

Os valores obtidos por Pröhl et al. (1991) para translocação de ^{137}Cs em feijão vagem apresentam divergências com os determinados neste trabalho. Embora pertençam à mesma família, a colheita de cada variedade é realizada em momentos distintos. O feijão vagem, em condições normais de desenvolvimento, tem sua colheita iniciada entre 55 e 90 dias após o plantio (Murayama, 1983), sendo consumidos a vagem e os feijões ainda verdes.

Tabela 16. Máximos de translocação de ^{60}Co e ^{137}Cs em feijoeiro.

Definição	Radionuclídeo	Tempo (dias)	Valor de translocação
1	(^{60}Co)	t = 46	106,9mBq kg ⁻¹ /Bq kg ⁻¹
1	(^{137}Cs)	t = 47	103,7mBq kg ⁻¹ /Bq kg ⁻¹
2	(^{60}Co)	t = 47	0,128 Bq m ⁻² /Bq m ⁻²
2	(^{137}Cs)	t = 50	0,149 Bq m ⁻² /Bq m ⁻²
3	(^{60}Co)	t = 52	3,10 Bq kg ⁻¹ /Bq m ⁻²
3	(^{137}Cs)	t = 52	3,18 Bq kg ⁻¹ /Bq m ⁻²

O feijão é colhido seco entre 90 e 110 dias após o plantio e consumidas apenas as sementes. A produtividade brasileira de feijão é aproximadamente 500 kg ha⁻¹ (CATI, 1997), porém o estado de São Paulo já dobrou esta marca. Já o feijão vagem tem produtividade entre 5000 e 10000 kg ha⁻¹ (Murayama, 1983) para as variedades mais produtivas. Assim, a produtividade maior e colheita anterior ao máximo da translocação de nutrientes no feijão vagem são fatores que podem explicar tais discrepâncias.

Comparativamente aos resultados apresentados por Oestling et al. (1989), em um experimento com seis vasos com um feijoeiro por vaso e sem delineamento experimental, os valores obtidos foram maiores. Os seis valores para coeficientes de translocação apresentados ficaram entre 10 % a 32 %, determinados pelo quociente da atividade total no fruto pela atividade total no feijoeiro. Tomando os valores máximos obtidos neste experimento e calculando os coeficientes de translocação segundo a forma apresentada, o máximo valor encontrado (19,7 %) foi o do tratamento 2, 3ª repetição. As repetições 1, 2 e 4, respectivamente, oferecem valores iguais a 14,2 %, 13,9 % e 17,0 %. O valor médio de translocação (16,1 %) aqui obtido é 24 % menor que o valor médio (21 %) obtido por Oestling et al. (1989). De acordo com Voigt et al. (1991), diferenças percentuais de até 25 % constituem boa aproximação para este tipo de experimento em decorrência dos erros inerentes. Uma explicação para a referida diferença seria que, neste experimento, as aspersões foram realizadas em intervalos quinzenais, sendo possível que o máximo de translocação real tenha ocorrido entre as aspersões de 45 e 60 dias. Outra possível razão desta diferença seria a infestação da cultura pelo mosaico comum e dourado.

Os valores máximos de translocação de ^{60}Co e ^{137}Cs ocorreram entre 46 e 52 dias após o plantio. Este fato foi atribuído à infestação da cultura pelos vírus, uma vez que em uma situação normal, sem ataque de nenhuma moléstia, os cultivares comuns de feijoeiro, de ciclo entre 90 e 100 dias, cessam o processo de crescimento vegetativo aos 70 a 80 dias e intensificam o de translocação de nutrientes (CATI, 1997). Assim, os máximos de translocação para feijoeiro devem ocorrer mais tardiamente que os determinados neste trabalho.

5. CONCLUSÕES

As translocações folha-fruto de ^{60}Co e ^{137}Cs foram quantitativamente semelhantes.

Observou-se dependência funcional entre os coeficientes de translocação folha-fruto e o tempo transcorrido após o plantio.

Os coeficientes de translocação determinados para ^{90}Sr para as definições 1, 2 e 3 ficaram abaixo de $2,5 \text{ mBq kg}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$, $0,005 \text{ Bq m}^{-2}/\text{Bq m}^{-2}$ e $0,04 \text{ Bq kg}^{-1}/\text{Bq m}^{-2}$, respectivamente, apontando para valores inferiores em pelo menos duas ordens de grandeza quando comparados com a translocação de ^{60}Co e ^{137}Cs .

A infestação da cultura pelos vírus alterou o período do ciclo vegetativo do feijoeiro. Assim, é provável que este fator tenha influenciado o instante de translocação máxima e os coeficientes determinados.

ANEXO A

**Programa estatístico elaborado para o SAS para análise de variância e testes F
dimensionado para 4 tratamentos e 4 blocos**

```
OPTIONS NODATE PS=60;
TITLE"TRANSLOCAÇÃO EM FEIJOEIRO";
DATA BEAN3;
DO DELTAT=30 TO 75 BY 15;
  DO BLOCK=1 TO 4;
  INPUT TRANS @@; OUTPUT;
  END;
END;
CARDS;
Inserir os dados neste ponto, separando-os por espaços ou colocando-os um por linha
;
PROC PRINT;
RUN;
```

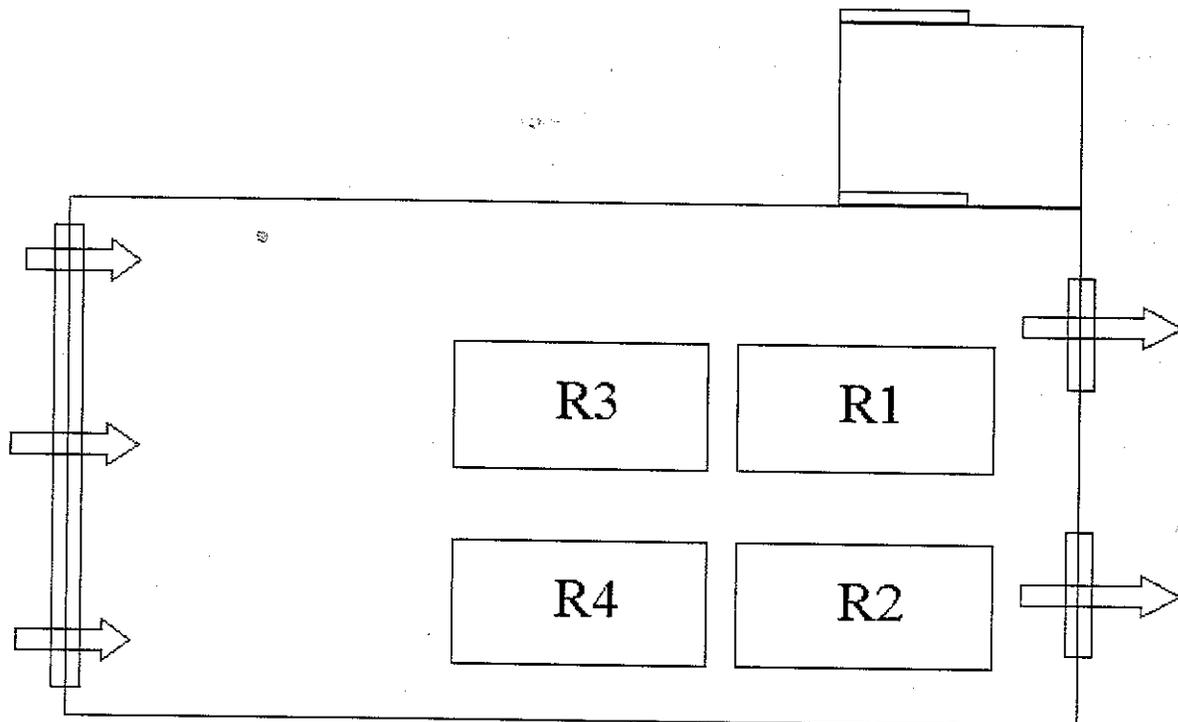
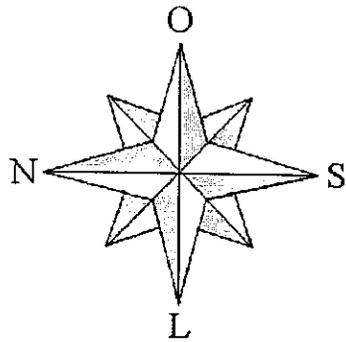
```
TITLE"Análise de variância e análise de regressão polinomial";
PROC GLM DATA=BEAN3;
  CLASS DELTAT BLOCK;
  MODEL TRANS=DELTAT BLOCK/SS3;
  CONTRAST "EFIC LINEAR" DELTAT -3 -1 1 3;
  CONTRAST "EFIC QUADRA" DELTAT 1 -1 -1 1;
  CONTRAST "EFIC CUBICA" DELTAT -1 3 -3 1;
RUN;
```

```
TITLE "Modelo de regressão polinomial de grau 1";
PROC GLM DATA=BEAN3;
MODEL TRANS=DELTAT/SS1;
RUN;
```

```
TITLE "Modelo de regressão polinomial de grau 2";
PROC GLM DATA=BEAN3;
MODEL TRANS=DELTAT DELTAT*DELTAT/SS1;
RUN;
```

```
TITLE "Modelo de regressão polinomial de grau 3";
PROC GLM DATA=BEAN3;
MODEL TRANS=DELTAT DELTAT*DELTAT DELTAT*DELTAT*DELTAT/SS1;
RUN;
```

ANEXO B**Distribuição dos blocos e vasos na casa de vegetação**



R3 – T5, T4, T6, T4, T3, T1

R1 – T2, T6, T1, T4, T3, T5

R4 – T3, T5, T2, T6, T4, T1

R2 – T3, T1, T5, T4, T2, T6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARKROG, A. Translocation of radionuclides in cereal crops. In: COUGHTREY, P.J.; BELL, J.N.; ROBERTS, T.M. (Ed.) **Ecological aspects of radionuclide release**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1983. p.81-90. (Special Publication Series of the British Ecological Society, 3).
- CARINI, F.; SCOTTI, I.A.; MONTRUCCOLI, M.; SILVA, S. The use of non-lethal defoliation to minimize the foliar uptake of radiocesium by the vine. In: ANNUAL MEETING OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR NEW METHODS IN AGRICULTURAL RESEARCH – ESNA, 24., Varna, 1994. **Book of abstracts**. Stara Zagora, 1994. p.96-97.
- CARINI, F.; SCOTTI, I.A.; MONTRUCCOLI, M.; SILVA, S. ^{134}Cs foliar contamination of vine: translocation to grapes and transfer to wine. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RADIOECOLOGY, Vienna, 1996. Vienna: IAEA, 1996. p.163-169.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Diretrizes básicas de radioproteção**. Rio de Janeiro: CNEN, 1988. (CNEN - NE - 3.01).

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Serviços de radioproteção**. Rio de Janeiro: CNEN, 1988. (CNEN - NE - 3.02).

COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL - CATI. **Manual técnico das culturas**. 2.ed.rev.atual. Campinas: CECOR, 1997. Tomo 1.

COSTA, C.L.; ROSSETTO, C.J. Pragas e moléstias e seu controle. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE FEIJÃO, 1., Campinas, 1972. **Anais**. Viçosa, 1972. v.2-F, p.283-384.

ELETRONUCLEAR. **ANGRA 2: KPC - Sistema de Processamento de Concentrados Radioativos**. Angra dos Reis, 1998. 67p.

FARIA, J.C. Doenças causadas por vírus. In: ZIMMERMANN, M.J.O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.) **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. p.547-572.

GOMES, F.P. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária**. 1.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1984. 160p.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 13.ed. Piracicaba: Nobel, 1990. 403p.

GUIMARÃES, C.M. Efeitos fisiológicos do estresse hídrico. In: ZIMMERMANN, M.J.O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.) **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. p.157-174.

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA - IRD. **Determinação radioquímica do ^{90}Sr** . Rio de Janeiro: IRD, 1994. 12p.

LEITE, A.D. **A energia do Brasil**. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1997. 528p.

MALAVOLTA, E. Nutrição e adubação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE FEIJÃO, 1., Campinas, 1971. **Anais**. Viçosa, 1972. v.1-D, p.209-244.

MONTE, L.; QUAGGIA, S.; POMPEI, F.; FRATARCANGELI, S. The behaviour of ^{137}Cs in some edible fruits. **Journal of Environmental Radioactivity**, v.11, p.207-214, 1990.

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

MURAYAMA, S. **Horticultura**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1983. 304p.

NIELSEN, O.J. **A literature review on radioactivity transfer to plants and soil**. Roskilde: Risø National Laboratory, 1981.

NOGUEIRA, M.C.S. **Estatística experimental aplicada à experimentação agrônômica**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Matemática e Estatística, 1997. 249p.

OESTLING, O.; KOPP, P.; BURKART, W. Foliar uptake of cesium, iodine and strontium and their transfer to the edible parts of beans, potatoes and radishes. **Radiation Physics and Chemistry**, v.33, p.551-554, 1989.

OZLUOGLU, N. The comparison of the results of a continuous release model and the measurements of some foodstuff affected from Chernobyl. Experiments and models. In: SYMPOSIUM ON THE VALIDITY OF ENVIRONMENTAL TRANSFER MODELS, Stockholm, 1991. p.71-78.

PAASICALLIO, A.; RANTAVAARA, A.; SIPPOLA, J. The transfer of cesium-137 and strontium-90 from soil to food crops after the Chernobyl accident. **The Science of the Total Environment**, v.155, p.109-124, 1993.

PRÖHL, G.; VOIGT, G.; MÜLLER, H. Translocation of cesium in plants after foliar deposition. Experiments and models. In: SYMPOSIUM ON THE VALIDITY OF ENVIRONMENTAL TRANSFER MODELS, Stockholm, 1991. p.59-70

ROCHEDO, E.R.R., CONTI, L.F.C., PARETZKE, H.G. PARATY – A dynamic model for radiological assessments in urban areas. **Radiation and Environmental Biophysics**, v.35, p.243-261, 1996.

ROSOLEM, C.A.; MARUBAYASHI, O.M. Seja o doutor do seu feijoeiro. **Informações Agronômicas**, n.68, p.1-16, 1994.

SANTINA, M.D. Determinação das zonas de segurança da Central Nuclear de Angra dos Reis conforme o modelo de difusão de radiação na atmosfera. São

Paulo, 1978. 161p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA - SBF. **Relatório do Grupo de Trabalho sobre Poluição Nuclear**. São Paulo: SBF, 1977. (Boletim Especial, 1).

TULMANN NETO, A. Obtenção de resistência ou tolerância ao vírus do mosaico dourado do feijoeiro (*Phaseolus Vulgaris L*) através de indução de mutação. Piracicaba, 1979. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

VIEIRA, C. **Cultura do feijão**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1978. 146p.

VOIGT, G.; PRÖHL, G.; MÜLLER, H. Experiments on the seasonality of the cesium translocation in cereals, potatoes and vegetables. **Radiation and Environmental Biophysics**, v.30, p.295-303. 1991.

USP - Campus de Piracicaba
DIVISÃO DE BIBLIOTECA
E DOCUMENTAÇÃO

12/28/04/2000

d. O autor

R\$ 50,00

4

(043)

Vol.

an. M113c

Ex.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Macacini, José Flávio

Coeficientes de translocação folha-fruto de ^{60}Co , ^{90}Sr e
 ^{137}Cs em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) / José Flávio Macacini.

-- Piracicaba, 2000.

63p. : il.

Dissertação (mestrado) -- Centro de Energia Nuclear na
Agricultura, 2000.

1. Espectrometria gama 2. Fallout 3. Itrio 90 4. Mosaico
comum do feijoeiro 5. Mosaico dourado do feijoeiro 6. Precipitação
radioativa 7. Radionuclídeo artificial I. Título

CDU 635.652:623.454.8